

ОДНОФАЗНЫЕ СЕЛСИНЫ

Судпрогиз - 1977

Д. П. МКРТЧЯН, В. В. ХРУЩЕВ

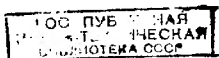
ОДНОФАЗНЫЕ СЕЛСИНЫ



ГОСУДАРСТВЕННОЕ СОЮЗНОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

ЛЕНИНГРАД

1957



В книге изложены основы теории, методы расчета и экспериментального исследования индикаторных и трансформаторных селсинов, кроме того, приведены их конструкции.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занимающихся вопросами проектирования и эксплуатации селсинов, а также для студентов старших курсов электротехнических вузов.

ПРЕДИСЛОВИЕ

В существующей отечественной и зарубежной литературе, посвященной селси́нам, почти не освещаются инженерные методы расчета и экспериментального исследования селси́нов. Крайне недостаточно в работах, посвященных этому вопросу, дается описание их конструкций. Ряд вопросов теории селси́нов, например: параллельная работа селси́нов, работа селси́нов с длинными линиями, демпфирование колебаний при согласовании, статические и динамические ошибки селси́нов и т. д., не освещены совсем или изложены весьма поверхностно.

Настоящая работа посвящена теории, методам расчета и экспериментального исследования однофазных селси́нов.

Основные вопросы теории даны на основе учения о двух реакциях для переходных режимов синхронной машины, разработанного авторами применительно к селси́нам. Авторы также учли многолетний опыт проектирования селси́нов на предприятиях судостроительной промышленности.

Читатели, впервые встречающиеся с синхронными передачами, могут получить предварительные сведения о них и о теории однофазных селси́нов в введении и I главе книги.

Хотя мы стремились возможно полнее осветить различные вопросы теории селси́нов, их конструкции, методы расчетов и экспериментального исследования, в книге неизбежны недостатки при освещении тех или иных вопросов. Авторы будут благодарны за все замечания. Ваши пожелания просим направлять по адресу: Ленинград, 65, ул. Дзержинского, 10, „Судпромгиз“.

Введение, главы I, VI и VII написаны Д. П. Мкртчяном, главы II, III, IV и V — В. В. Хрущевым, глава VIII написана авторами совместно.

Авторы весьма признательны проф. Д. В. Васильеву и С. М. Магину за ряд ценных указаний, сделанных ими при просмотре рукописи.

Выражаем глубокую благодарность инж. И. И. Ивашиной, принявшей деятельное участие в подготовке рукописи.

*Д. Мкртчян,
В. Хрущев.*

ВВЕДЕНИЕ

§ 1. НАЗНАЧЕНИЕ СИНХРОННОЙ ПЕРЕДАЧИ И ЕЕ ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

При решении различных технических задач часто приходится сталкиваться с необходимостью передачи различных величин на расстоянии. Как правило, сначала эти величины преобразуются в угловые величины, а затем уже передаются, так как передача угловых поворотов осуществляется наиболее простыми средствами. Например, если необходимо передать данные об уровне жидкости в баке, то предварительно уровень жидкости преобразуется в угловое положение некоторого вала. Один из способов преобразования уровня жидкости в угловое положение показан на рис. 1. Поплавок 1 прикреплен к концу рычага 2, вращающегося вокруг шарнира 3. Очевидно, что каждому уровню жидкости соответствует вполне определенное угловое положение рычага.

Для управления агрегатами на расстоянии необходимо:
а) знать все величины, характеризующие работу агрегатов;
б) иметь возможность с места управления воздействовать на различные органы управления.

Решение как одной, так и другой задачи в большинстве случаев сводится к передаче угловых поворотов на расстоянии: в первом случае от управляемых агрегатов к месту управления; во втором случае — обратно. Первоначально передача угловых поворотов на расстоянии производилась механическим способом: при помощи вала, стальных тросов, тяг и т. д. Однако с увеличением расстояния между постом управления и управляемыми машинами такой способ передачи угловых поворотов стал весьма затруднительным, а иногда совершенно невозможным. Поэтому были изготовлены электромеханические приборы для передачи угловых поворотов на расстоянии, известные под названием синхронных передач.

Синхронной передачей называется электромеханическое устройство, осуществляющее передачу угловых поворотов на расстоянии из одного пункта в другой при отсутствии механической связи между пунктами. Очень часто вместо термина синхронная передача используют термин — система синхронной связи, означающий то же самое.

Синхронная передача состоит из задающего устройства — датчика, помещающегося в пункте, откуда происходит передача угловых поворотов; одного или нескольких приемных устройств — приемников, находящихся в пунктах, куда должны поступать угловые повороты; электрической линии связи в виде нескольких проводов, соединяющих датчик с приемниками. Ось датчика механически поворачивается на величину, равную или пропорциональную передаваемой величине, а ось приемника сама поворачивается одновременно с датчиком и воспроизводит на шкале передаваемую величину. Для того чтобы при передаче данных не вводилась ошибка, ось приемника должна в точности воспроизводить все угловые повороты датчика, т. е. ось приемника должна синхронно вращаться с осью датчика. Следовательно, синхронная передача электромеханическим способом по существу выполняет роль вала, при этом упругие силы вала заменяются электромагнитными силами.

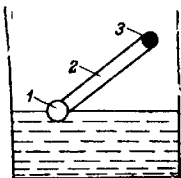


Рис. 1. Схема преобразования уровня жидкости в угловое перемещение вала.

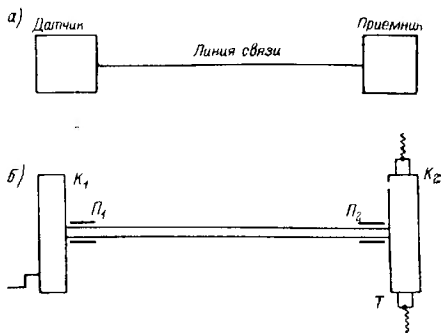


Рис. 2. а — схема синхронной передачи; б — механическая аналогия синхронной передачи.

На рис. 2, а схематически представлена синхронная передача, состоящая из датчика, линии связи и приемника, а на рис. 2, б — механическая аналогия синхронной передачи, которая состоит из задающего колеса K_1 с рукояткой, приемного колеса K_2 и упругого вала, соединяющего эти колеса. Вал

вращается в подшипниках Π_1 и Π_2 , расположенных вблизи колес. К ободу приемного колеса прижимаются тормозные колодки Т, создающие момент нагрузки M_n . Колесо K_1 выполняет роль датчика синхронной передачи, колесо K_2 — роль приемника, а вал — роль линии связи.

Обозначим:

- θ_1 и θ_2 — угловые положения колес K_1 и K_2 по отношению к некоторому фиксированному положению;
- M_{T_1} и M_{T_2} — моменты трения в подшипниках Π_1 и Π_2 ;
- m_0 — жесткость вала, т. е. величина механического момента, закручивающего вал по всей его длине на один градус;
- I — момент инерции колеса K_2 .

Рассмотрим работу механической передачи в статическом режиме. Статический режим характеризуется тем, что передача угла поворота производится хотя и непрерывно, но с фиксацией его отдельных значений. Если колесо K_1 поворачивать за рукоятку и устанавливать в различных положениях, то приемное колесо K_2 также будет поворачиваться и принимать различные положения. Однако угловые положения колес K_1 и K_2 не будут одинаковыми. Всегда будет существовать некоторая разница $\theta_1 - \theta_2$ вследствие закручивания вала под действием момента на приемнике ($M_n + M_{T_2}$). Определим наибольшую величину разности угловых положений задающего и приемного колес. Предположим, что колесо K_1 медленно поворачивается; при этом будет происходить закручивание вала и на оси приемного колеса возникнет вращающий момент, пропорциональный углу закручивания вала

$$M_2 = m_0(\theta_1 - \theta_2). \quad (1.1)$$

Пока момент M_2 будет меньше момента нагрузки приемника ($M_n + M_{T_2}$), последний остается неподвижным и начнет двигаться только при таком угле поворота задающего колеса, когда

$$M_2 = m_0(\theta_1^* - \theta_2^*) = M_n + M_{T_2}. \quad (1.2)$$

Отсюда следует, что максимальная разница в угловых положениях задающего и приемного колес определяется выражением

$$\theta^* = \theta_2^* - \theta_1^* = \pm \frac{M_n + M_{T_2}}{m_0}. \quad (1.3)$$

Разность угловых положений датчика и приемника называется углом рассогласования. Из-за наличия угла рассогласования между датчиком и приемником при передаче на расстоянии какой-либо величины вводится ошибка, опреде-

ляющая точность синхронной передачи. Из формулы (1.3) следует, что угол рассогласования при механической передаче будет тем меньше, чем меньше сумма моментов нагрузки и трения приемника ($M_n + M_{T_2}$) и чем больше жесткость вала (m_0).

В статическом режиме механическая передача будет работать без угла рассогласования только тогда, когда моменты трения и нагрузки равны нулю или жесткость вала чрезвычайно велика. Так как практически не может быть выполнено ни одно из этих требований, то всегда будет иметь место некоторый угол рассогласования между осями датчика и приемника, и, следовательно, при передаче данных на расстоянии всегда будет вводиться какая-то ошибка. Необходимо отметить, что момент трения задающего устройства M_{T_1} не влияет на точность передачи угловых поворотов, а является лишь добавочной нагрузкой для внешних сил, поворачивающих задающее устройство.

При быстрых поворотах колеса K_1 возникает переходной режим, при котором, кроме моментов нагрузки и трения, действует момент сил инерции, и поведение приемного колеса описывается дифференциальным уравнением

$$I \frac{d^2\theta_2}{dt^2} = m_0(\theta_1 - \theta_2) + M_n + M_{T_2}. \quad (1.4)$$

В зависимости от соотношения величин I , m_0 и $M_n + M_{T_2}$ переходной процесс может быть аperiodическим или носить колебательный характер. На рис. 3 показано изменение угла θ_2 при быстром повороте колеса K_1 на некоторый угол для случая аperiodического переходного процесса, а на рис. 4 — для случая колебательного переходного процесса. Чем меньше сумма моментов нагрузки и трения ($M_n + M_{T_2}$) и чем больше момент инерции I и жесткость вала m_0 , тем скорее в системе имеет место колебательный переходный процесс. Как видно из этих рисунков, в обоих случаях приемное колесо K_2 принимает новое установившееся положение не сразу, а по истечении некоторого времени, которое называется временем успокоения или временем согласования системы.

Все сказанное относительно механической аналогии синхронной передачи (рис. 2, б) полностью относится к самой синхронной передаче (рис. 2, а).

При повороте оси датчика на оси приемника возникает вращающий момент, который называется синхронизирующим моментом, так как он стремится повернуть приемник и установить его в синхронное положение с датчиком. Изменение синхронизирующего момента приемника в зависимости от угла рассогласования определяется формулой (1.1) только при малых значениях угла. При больших значениях угла рассогласования этот момент увеличивается медленнее и при

некотором угле достигает максимума. На рис. 5 представлена кривая зависимости синхронизирующего момента приемника от угла рассогласования, которая характеризуется величиной максимального синхронизирующего момента $M_{\max}$ и крутизной характеристики в начальной части кривой. Крутизна кривой синхронизирующего момента в ее начальной части определяет

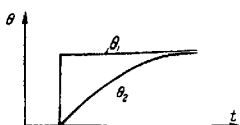


Рис. 3. Аperiодический переходный процесс в синхронной передаче.

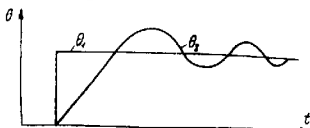


Рис. 4. Колебательный переходный процесс в синхронной передаче.

величину момента при рассогласовании датчика и приемника на единицу угла (например, на 1°) и называется удельным синхронизирующим моментом. Удельному моменту синхронной передачи соответствует жесткость вала m_0 в рассмотренной выше механической аналогии. Моменты трения механической системы M_{T1} и M_{T2} соответственно заменяются

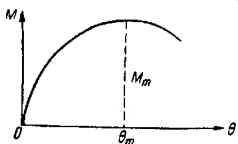


Рис. 5. Кривая синхронизирующего момента $M = f(\theta)$.

моментами трения датчика и приемника синхронной передачи, а момент нагрузки приемного колеса K_2 — моментом нагрузки на оси приемника.

При повороте оси датчика и установке ее в различных положениях ось приемника также будет поворачиваться и устанавливаться в соответствующих положениях.

Подобный режим работы синхронной передачи называется режимом поворота. Разность угловых положений осей датчика и приемника при работе синхронной передачи в режиме поворота называется статической ошибкой.

Величина статической ошибки синхронной передачи, как и механической передачи, увеличивается с возрастанием моментов трения и нагрузки на приемнике и уменьшается с увеличением удельного момента. Однако в отличие от механической передачи в реальной синхронной передаче всегда бывают статические ошибки даже при отсутствии нагрузки и момента трения на оси приемника. Эти ошибки зависят от различных причин: конструкции датчика и приемника; технологии их изготовления; условий эксплуатации и т. д.

Если вращать ось датчика с некоторой скоростью, то ось приемника будет вращаться с такой же скоростью. При изменении скорости вращения оси датчика по определенному закону скорость оси приемника будет изменяться по этому же закону. Такой режим работы называется режимом вращения или динамическим режимом синхронной передачи. Разность угловых положений осей датчика и приемника при работе синхронной передачи в режиме вращения называется динамической ошибкой.

В настоящее время синхронные передачи нашли весьма широкое применение почти во всех областях техники для передачи различных данных на расстоянии (дистанционное указание) и для приведения в действие различных органов управления (дистанционное управление). Они применяются на электростанциях, каналах, в различных отраслях промышленности, в морском флоте, авиации и т. д.

Система синхронной связи, служащая для передачи данных, не имеет на приемнике какой-либо нагрузки: на оси приемника находится только сбалансированная стрелка или шкала. Такие синхронные передачи дают возможность сообщать на расстоянии об уровне жидкостей, о положении задвижек, щитов, шлюзовых ворот и т. д.; имеют широкое применение в приборах управления стрельбой как для ввода данных в центральный прибор, так и для передачи выработанных данных на орудия; служат для указания углового положения антенн радиолокационных станций, рулей, элеронов самолетов и т. д.

Реже синхронные передачи применяются в производственных целях: приведение в действие различных органов управления вентилей, затворов и т. п.; замыкания различных контактных устройств и т. д. При этом в зависимости от величины момента нагрузки на оси приемника будет вводиться та или иная дополнительная ошибка в передаваемые синхронной системой связи данные. Для уменьшения ошибки необходимо иметь приемники более мощные, чем те, которые применяются для передачи данных, т. е. приемники, обладающие большим удельным и максимальным моментами.

Рассмотрим основные показатели синхронной передачи, которые определяют целесообразность применения той или иной системы синхронной связи в приборах.

Таковыми показателями являются: 1) статическая точность; 2) динамическая точность; 3) удельный синхронизирующий момент; 4) максимальный синхронизирующий момент; 5) максимальная скорость вращения; 6) время успокоения; 7) способность к самосинхронизации.

Остановимся более подробно на характеристике и значении каждого из этих показателей синхронной передачи.

Статическая точность синхронной передачи определяется величиной ошибки, получающейся при работе

этой передачи в режиме поворота. Статическая ошибка измеряется как угол рассогласования между осями датчика и приемника при различных неподвижных положениях датчика.

В широком смысле слова под статической ошибкой подразумевается угол рассогласования между осями датчика и приемника как при работе системы синхронной связи с нагрузкой, так и без нагрузки. Однако большинство систем синхронной связи служит только для передачи данных и характеризуется статической ошибкой при отсутствии нагрузки.

Статическая ошибка синхронных передач дается обычно в угловых градусах.

Статическая точность является одним из важнейших показателей синхронной передачи. С развитием техники и расширением области применения синхронных передач требования к их точности все время повышаются.

Динамическая точность характеризуется величиной динамической ошибки, которая определяется как разность угловых положений осей датчика и приемника при работе синхронной передачи в режиме вращения. Динамическая ошибка может быть определена как при вращении оси датчика с равномерной скоростью, так и при вращении ее с переменной скоростью.

Очевидно, что во втором случае динамические ошибки по величине будут больше, чем в первом случае, так как на оси приемника будут действовать инерционные моменты, пропорциональные ускорению. Как правило, динамические ошибки синхронных передач значительно больше статических ошибок.

Динамические ошибки так же, как и статические ошибки, измеряются в градусах.

Вследствие широкой автоматизации различных процессов сокращается время их протекания, что влечет за собой увеличение скорости вращения синхронных передач. В некоторых случаях системы работают только в режиме вращения с постоянной или переменной скоростью, например синхронная передача, предназначенная для указания углов качки корабля. Поэтому динамическая точность также является одним из важнейших показателей синхронной передачи.

Как было сказано выше, удельным синхронизирующим моментом, или удельным моментом, называется крутизна кривой синхронизирующего момента в ее начальной части или величина синхронизирующего момента на оси приемника при рассогласовании его на единицу угла относительно датчика. Этот момент обычно измеряется в граммосантиметрах на градус (*гсм/град*) или граммодециметрах на градус (*гдм/град*). Удельный момент в значительной степени определяет точность системы синхронной связи при отсутствии нагрузки и надежность ее в работе. Для пояснения этого обратимся к модели синхронной передачи (см. рис. 2, б). Пред-

положим, что приемное колесо K_2 не несет нагрузки и имеет небольшой момент трения $M_{т2}$. Если его соединить с задающим колесом K_1 тонким эластичным валом, то между их осями могут возникать значительные углы рассогласования, что введет большую ошибку в передаваемую величину. Кроме того, ошибка будет в значительной степени колебаться при изменении момента трения подшипников в условиях эксплуатации.

Если же соединить приемное и задающее колесо толстым жестким валом, то будут незначительными как сам угол рас-

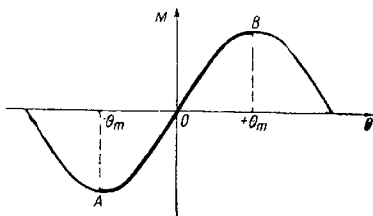


Рис. 6. Устойчивая (показана жирной линией) и неустойчивая части кривой синхронизирующего момента.

согласования между ними, так и его изменения при увеличении трения в подшипниках. При наличии достаточной жесткости вала величина угла рассогласования между колесами может изменяться во вполне приемлемых пределах.

Как уже было сказано, жесткость вала механической модели аналогична удельному моменту синхронной передачи. Следовательно, синхронные передачи, у которых приемники обладают малым удельным моментом, имеют значительные неустойчивые ошибки в условиях эксплуатации. Наоборот, синхронные передачи с большим удельным моментом допускают малую устойчивую ошибку. Кроме того, при большом удельном моменте приемник может иметь на оси некоторую нагрузку и при этом не иметь значительных ошибок.

Величина удельного момента зависит от скорости вращения синхронной передачи, поэтому различают удельные моменты - статический и динамический. У большинства систем синхронной передачи удельный момент в динамике меньше удельного момента в статике.

На рис. 6 изображена типичная кривая зависимости синхронизирующего момента приемника от угла рассогласования. С увеличением угла рассогласования

синхронизирующий момент растет, достигая при некотором угле θ_m максимального значения $M_{\max}$, при дальнейшем же увеличении угла рассогласования синхронизирующий момент уменьшается. Участок AB кривой момента, где с увеличением угла рассогласования синхронизирующий момент растет, называется устойчивым. Этот участок выделен на рис. 6 жирной линией и простирается от $-\theta_m$ до $+\theta_m$.

Величина максимального синхронизирующего момента, как и удельного момента, зависит от скорости — с увеличением скорости максимальный синхронизирующий момент уменьшается.

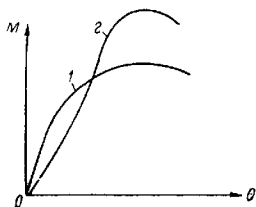


Рис. 7. Виды кривых синхронизирующего момента.

В системах синхронной связи, предназначенных для передачи данных, величина максимального момента в нормальном режиме работы не имеет практического значения; величина удельного момента, наоборот, для этих систем имеет важное значение.

В предназначенных для производственных целей синхронных передачах, которые имеют на осях приемников нагрузочные моменты, максимальный момент

имеет важнейшее значение, так как во избежание нарушения работы синхронной передачи величина рабочего момента на оси приемника должна находиться в определенном соотношении с величиной максимального синхронизирующего момента. Обычно максимальный синхронизирующий момент должен в несколько раз превосходить момент нагрузки.

На рис. 7 приведены две кривые приемников с различными удельными и максимальными синхронизирующими моментами. Очевидно для систем, предназначенных для передачи данных, более подходит приемник с кривой 1, так как он имеет значительный удельный момент и обеспечивает большую точность, а для работы под нагрузкой — приемник с кривой 2, так как у него больше максимальный синхронизирующий момент.

Удельный и максимальный синхронизирующий моменты, а также точность синхронной передачи зависят от скорости вращения. В некоторых системах синхронной связи удельный и максимальный моменты уменьшаются с возрастанием скорости настолько сильно, что даже при незначительных скоростях вращения синхронная передача перестает действовать. Поэтому для каждой системы синхронной связи существует некоторая предельная скорость вращения, выше которой она бездействует. Максимальная скорость вращения зависит от величины нагрузки.

При резких поворотах оси датчика ось приемника занимает

синхронное положение не сразу, а по истечении некоторого времени, называемого временем успокоения. Для получения большей точности приемники делаются с малым моментом трения, большим удельным моментом и ротор их обычно имеет значительный момент инерции. Все это приводит к тому, что переходный процесс, как правило, носит колебательный характер (см. рис. 4). В ряде случаев затухание колебаний происходит очень медленно и время успокоения колебаний велико, что неприемлемо для практики. Кроме того, в отличие от механической передачи, показанной на рис. 2,б, в электрических синхронных передачах по причинам, которые будут рассмотрены ниже, могут иметь место незатухающие колебания, т. е. при резком повороте оси датчика ось приемника будет бесконечно долго колебаться перед тем, как занять синхронное положение. Иногда она может совсем выйти из этого положения. Поэтому в большинстве синхронных передач для исключения незатухающих колебаний и уменьшения времени успокоения приемники снабжаются механическими или электрическими демпферными устройствами, которые вводят в систему затухания без увеличения момента трения. Параметры демпферного устройства выбираются таким образом, чтобы обеспечить определенное время затухания колебаний ротора приемника.

В механической системе (см. рис. 2,б) имеется постоянная связь между задающим и приемными колесами и система требует согласования только один раз после монтажа установки. В отличие от механической системы, в электрических синхронных передачах связь между датчиком и приемником имеется не все время, а только при нахождении системы под током. При выключенном питании связь между датчиком и приемником отсутствует и они могут занимать различные положения. Если предварительно согласованную систему выключить, а оси приемника и датчика рассогласовать, установив их в различных положениях, то при повторном включении питания в некоторых системах приемник автоматически согласуется с датчиком, а в других системах — не согласуется. Систему синхронной связи, которая при включении питания автоматически согласуется, независимо от того, в каких положениях находились оси датчика и приемника до момента включения, принято считать обладающей синхронизацией. В системах, которые не обладают свойством самосинхронизации, требуется после включения питания согласовать шкалы. Лишь после согласования шкал можно производить передачу данных, что на практике весьма неудобно, а во многих случаях и невозможно. Поэтому в настоящее время наибольшее распространение получили такие системы синхронных передач, которые обладают способностью к самосинхронизации.

Мы разобрали основные показатели систем синхронной

связи. Рассмотренный нами режим работы синхронной передачи, когда датчик поворачивается принудительно, а приемник сам устанавливается в синхронное с датчиком положение под воздействием синхронизирующего момента, будем называть индикаторным режимом работы.

Основные требования, предъявляемые к системам синхронной связи, работающим в индикаторном режиме, следующие:

- а) большая статическая и динамическая точности (от нескольких градусов до нескольких десятых долей градуса);
- б) большой удельный и максимальный синхронизирующий моменты при заданных габаритных размерах;
- в) высокая скорость вращения (несколько сотен, а иногда тысяч оборотов в минуту);
- г) минимальное время успокоения (несколько секунд);
- д) способность к самосинхронизации.

Однако не все системы синхронной связи обладают этими качествами. Поэтому в каждом отдельном случае должен быть произведен выбор системы. Например, для систем, предназначенных для передачи данных, особое значение имеет статическая и динамическая точности, а величина максимального момента не имеет практического значения (вследствие этого здесь следует отдать предпочтение системе с большой точностью).

При выборе же системы синхронной связи, предназначенной для выполнения определенной функции, особое внимание следует обратить на величину максимального момента (здесь, очевидно, надо выбирать систему с большим синхронизирующим моментом).

Ввиду того что датчик и приемники являются по существу электрическими аппаратами или машинами, к ним предъявляются также и общетехнические требования. Синхронные передачи должны работать надежно в течение длительного времени при изменении температуры и влажности в широких пределах, при вибрации, тряске и наклонах. Сопротивление и электрическая прочность изоляции обмоток, а также перегревы обмоток должны соответствовать существующим нормам. Кроме того, должна быть обеспечена нормальная работа синхронной передачи при колебании напряжения и частоты сети в определенных пределах, зависящих от типа, мощности источников питания и системы регулирования.

Индикаторные синхронные передачи можно подразделить:

а) по роду потребляемого тока — на системы синхронной связи постоянного тока и синхронные передачи переменного тока;

б) по способу действия — на импульсные системы синхронной связи, приемники которых поворачиваются скачкообразно и могут занимать только определенные фиксированные положения; системы синхронной связи непрерывного

действия, приемники которых поворачиваются плавно и могут занимать любое угловое положение;

в) по способу синхронизации — на синхронные передачи с самосинхронизацией, приемники которых автоматически согласуются с датчиком при включении питания, и на несамосинхронизирующиеся передачи, приемники которых необходимо согласовать после включения питания перед началом работы;

г) по мощности — на синхронные передачи, приемники которых предназначены для работы без нагрузки, только на шкалу или стрелку; синхронные передачи, приемники которых предназначены для выполнения определенных производственных функций, т. е. с нагрузкой на оси.

При работе синхронной передачи в индикаторном режиме основным действующим фактором является синхронизирующий момент, возникающий на оси приемника. Ряд синхронных передач может работать и в другом режиме, называемом трансформаторным. При трансформаторном режиме основным действующим фактором является напряжение на выходной обмотке приемника, которое служит мерой угла рассогласования системы. При согласованном положении приемника напряжение на выходной обмотке его равно нулю; при рассогласовании приемника на его выходной обмотке появляется напряжение, величина и знак которого зависят от величины и знака угла рассогласования. Обычно при работе трансформаторной синхронной передачи ротор приемника принудительно поворачивается таким образом, чтобы напряжение на его выходной обмотке всегда было равно нулю.

В последующих главах подробно рассматриваются только синхронные передачи, работающие на однофазном переменном токе. Главы I, II, III, IV и VII посвящены индикаторному режиму работы, а глава V — трансформаторному режиму работы силовых.

§ 2. КРАТКИЙ ИСТОРИЧЕСКИЙ ОБЗОР РАЗВИТИЯ СИСТЕМ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

Системы синхронной связи на постоянном токе. В 1890 году в Санкт-Петербурге телеграфным мастером Гейслером была предложена импульсная синхронная передача с тремя электромагнитами, предназначенная для применения в приборах управления кораблем. Уже в 1898 г. эта система нашла широкое применение на кораблях русского флота.

Схема устройства системы синхронной связи с тремя электромагнитами представлена на рис. 8. Основными элементами этой синхронной передачи являются коммутаторный датчик и электромагнитный приемник. Датчик представляет собой

переключатель с тремя неподвижными щетками $\text{Щ}_1, \text{Щ}_2, \text{Щ}_3$, расположенными под углом 120° друг к другу. Щетки поочередно присоединяются к зажиму (—) сети при помощи контактного сегмента С . Сегмент С соединяется с сетью через щетку Щ_4 и контактное кольцо К_1 . Приемник состоит из трех электромагнитов, расположенных под углом 120° друг к другу, якоря которых при помощи трех шатунов $\text{Ш}_1, \text{Ш}_2, \text{Ш}_3$ соединяются с концом кривошипа, вращающегося вокруг центра О_1 . Обмотки электромагнитов одними концами присоеди-

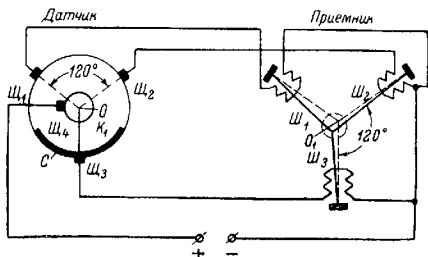


Рис. 8. Система синхронной передачи с тремя электромагнитами.

няются к щеткам датчика, а другие их концы соединяются вместе и приключаются к зажиму (—) сети.

При вращении оси датчика электромагниты возбуждаются поочередно и их якоря притягиваются, поворачивая при помощи шатунов кривошип. При каждом переключении электромагнитов ось О_1 будет поворачиваться на 120° ; следовательно, приемник будет иметь три фиксированных положения на один оборот. Такое небольшое количество фиксированных положений приемника заставляет прибегать к механической передаче на замедление к оси стрелки.

При отсутствии механической передачи, т. е. при установке стрелки непосредственно на оси приемника О_1 , система будет обладать самосинхронизацией, так как в каком бы положении ни находилась ось приемника до момента включения, после включения она принимает положение, согласованное с датчиком. Каждому положению датчика соответствует только одно устойчивое положение приемника. Очевидно, при наличии механической передачи система не обладает свойством самосинхронизации, так как при одном и том же положении осей датчика О и приемника О_1 ось стрелки может занимать n

различных положений (n — передаточное число от оси кри-вошипного механизма к оси стрелки.)

Наибольшая скорость вращения оси приемника O_1 обычно не превышает 5 об/сек, что происходит при 15 переключениях в секунду или 15 импульсах, посылаемых датчиком приемнику за секунду.

Система синхронной передачи с тремя электромагнитами известна под названием „системы Гейслера“. Датчик этой передачи относится к числу коммутаторных датчиков, а приемник — к группе электромагнитных приемников. Этот приемник обладает малым вращающим моментом, и поэтому система синхронной передачи с тремя электромагнитами использовалась только в виде индикаторной для вращения стрелки. В настоящее время эта система почти полностью вышла из употребления.

В 1888 году морским офицером В. В. Колокольцовым была предложена импульсная система синхронной связи на постоянном токе, имеющая два электромагнита, которые при помощи „собачек“ поворачивали храповое колесо в ту или другую сторону. Синхронная передача системы В. В. Колокольцова стала применяться на кораблях русского флота уже с 1890 г. Впоследствии эта система, несколько усовершенствованная, нашла широкое применение в России.

Электрическая схема синхронной передачи с двумя электромагнитами представлена на рис. 9. Система состоит из датчика Д в виде простого переключателя и приемника, устройство которого показано на рис. 10.

Приемник имеет два электромагнита $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$. На концах якорей $Я_1$ и $Я_2$ находятся „собачки“ C_1 и C_2 , которые сцепляются с храповыми колесами $ХК_1$ и $ХК_2$. Эти колеса имеют жесткое механическое соединение с планетарными колесами Π_1 и Π_2 механического дифференциала. Стрелка синхронной передачи укрепляется на оси механического дифференциала O . Якоря электромагнитов оттягиваются от сердечников при помощи пружин $Пр_1$ и $Пр_2$. При включении катушки электромагнита $\mathcal{E}_1$ в сеть поворотом переключателя Д налево притягивается якорь $Я_1$, а „собачка“ C_1 поворачивает храповое колесо $ХК_1$ на одно зубцовое деление в направлении против часовой стрелки. Ось дифференциала, а с ним и стрелка повернутся в том же направлении на половину деления зубца. При выключении катушки электромагнита посредством переключателя якорь $Я_1$ оттягивается от сердечника и занимает первоначальное положение. При включении катушки электромагнита $\mathcal{E}_2$ поворотом переключателя направо притягивается якорь $Я_2$, а „собачка“ C_2 поворачивает храповое колесо $ХК_2$ на одно зубцовое деление в направлении часовой стрелки. При этом ось дифференциала поворачивается по часовой стрелке на половину деления зубца. Следовательно, при

каждом включении электромагнитов стрелка поворачивается в том или другом направлении на угол $\frac{360}{2z}$, где z — число зубцов на храповом колесе.

Максимальное количество импульсов, при котором обеспечивается нормальная работа системы, не превышает 10 импульсов в секунду.

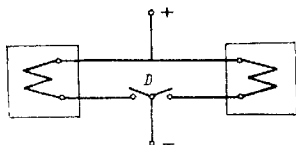


Рис. 9. Электрическая схема синхронной передачи с двумя электромагнитами.

В 1892 г. капитан 2-го ранга Ф. Н. Максимов предложил импульсную синхронную передачу на постоянном токе, в которой в качестве приемника применялся реактивный двигатель. Однако передача долгое время не могла найти практического применения из-за несовершенства самого реактивного двигателя.

Системы синхронной связи с реактивными двигателями начали находить широкое применение только в тридцатых годах этого столетия. Ниже приводится описание четырех-

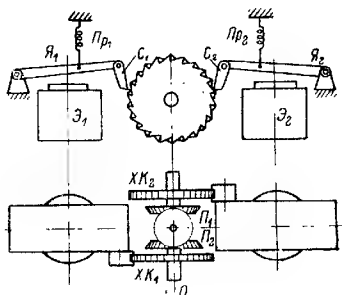


Рис. 10. Устройство приемника синхронной передачи с двумя электромагнитами.

проводной и трехпроводной синхронных передач, имеющих в качестве приемников реактивные двигатели.

Схематическое устройство синхронной четырехпроводной передачи показано на рис. 11. Приемник представляет собой синхронный реактивный двигатель с шестью полюсами на статоре, на каждом из которых помещается катушка возбуждения. Катушки противоположных полюсов соединяются последовательно, образуя фазы Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 , одни концы которых соедин-

няются вместе и подключаются к зажиму (—) сети, а вторые концы присоединяются к датчику. Ротор приемника изготовляется из мягкой стали и обычно имеет четыре явно выраженных полюса. Датчик представляет собой коммутатор в форме

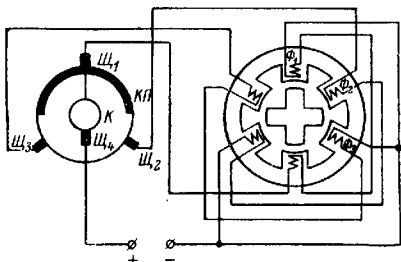


Рис. 11. Схематическое устройство четырехпроводной синхронной передачи.

цилиндра с контактной пластиной КП в виде дуги, соединенной с контактным кольцом К, на которое подается питание сети (+) через щетку Щ₄. По окружности, под углом 120° друг к другу, расположены три щетки Щ₁, Щ₂, Щ₃, каждая из которых соединяется с одной из фазных обмоток приемника.

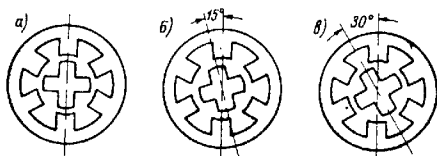


Рис. 12. Положения ротора приемника при подаче питания: а — на фазу Φ_1 ; б — на фазы $\Phi_1 - \Phi_2$; в — на фазу Φ_2 .

В положении, показанном на рис. 11, щетка Щ₁ находится на контактной пластине КП, ток проходит по фазе Φ_1 , а ротор приемника занимает положение, соответствующее рис. 12, а. При повороте оси датчика по часовой стрелке на 60°, кроме щетки Щ₁, на контактной пластине окажется также щетка Щ₂ и ток будет проходить по фазам Φ_1 и Φ_2 приемника, в результате чего ротор приемника повернется на 15° против часовой стрелки и займет положение, показанное на рис. 12, б. При

повороте оси датчика еще на 60° по часовой стрелке щетка Щ₁ сойдет с контактной пластины, фаза Φ_1 выключится и останется включенной только фаза Φ_2 ; ротор приемника повернется еще на 15° против стрелки и займет положение, показанное на рис. 12, в. При дальнейшем повороте датчика описанное явление будет повторяться. Ток поочередно будет поступать то в одну, то в две фазы одновременно; при каждом переключении приемник будет поворачиваться против часовой стрелки на 15° . При повороте оси датчика против часовой стрелки переключение фаз приемника будет происходить в обратном порядке

и ротор его будет поворачиваться по часовой стрелке. Количество фиксированных положений ротора приемника за один поворот будет равно 24.

Электрическая схема трехпроводной синхронной передачи приведена на рис. 13, а, б. Датчик представляет собой коммутатор с двумя дугообразными пластинами. К пластинам подводится питание при помощи контактных колец. Датчик имеет три щетки 1, 2, 3, расположенные под

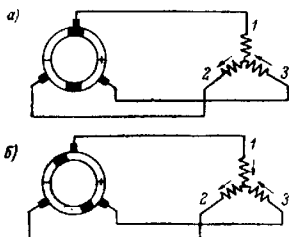


Рис. 13. Токи трехпроводной синхронной передачи для двух положений датчика.

углом 120° друг к другу, каждая из которых присоединяется к одному из концов фазных обмоток приемника. Приемник представляет собой синхронный реактивный двигатель, обычно четырехполюсный.

Фазные обмотки двигателя располагаются в равномерном распределенных пазах статора, который собирается из пластин, изготовленных из электротехнической стали. Ротор электродвигателя также собирается из таких же пластин электротехнической стали и имеет четыре явно выраженных полюса. Фазные обмотки статора соединяются в звезду. При повороте оси датчика фазы приемника переключаются. Питание подается то на две, то на три фазы, как это показано на рис. 13. При каждом переключении ось приемника поворачивается на 15° .

При увеличении скорости вращения датчика величина тока и вращающий момент приемника резко уменьшаются из-за значительной индуктивности фазных обмоток. Для повышения синхронизирующего момента при работе в режиме вращения в фазные цепи включают балластные сопротивления. В этом случае уменьшается постоянная времени цепи. При увеличении скорости вращения датчика величина тока и вращающего момента уменьшаются не так резко. Однако, включение бал-

ластных сопротивлений приводит к увеличению потребляемой мощности.

Трехпроводная синхронная передача, подобно всем вышеописанным системам синхронной связи, не обладает способностью к самосинхронизации, так как при одном и том же положении датчика четырехполюсный приемник может занимать четыре различных положения, ближайшие из которых отличаются на 90° . Поэтому система нуждается в согласовании перед началом работы после включения питания.

Для улучшения работы трехпроводной синхронной передачи с реактивными двигателями И. Г. Маругиным и Барбье-Бенаром были предложены особые датчики, представляющие

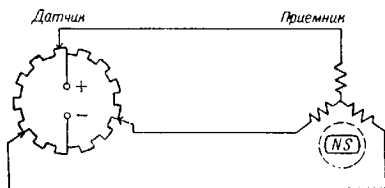


Рис. 14. Электрическая схема потенциометрической синхронной передачи с селсином постоянного тока.

собой конструктивное сочетание коллектора с потенциометром. Датчики имели хорошую коммутацию и давали возможность получать большое количество фиксированных положений приемника на один оборот.

Дальнейшим усовершенствованием этих систем является потенциометрическая синхронная передача, обеспечивающая плавный ход приемника.

Электрическая схема потенциометрической синхронной передачи представлена на рис. 14. Датчик представляет собой кольцевой потенциометр с катушкой из проволоки, к двум диаметрально расположенным точкам которого подается питание от сети постоянного тока. Непосредственно по обмотке двигаются три щетки, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 120° . Они соединяются с фазными обмотками приемника при помощи трех контактных колец. В качестве приемника в данной передаче применяется синхронный двигатель, ротор которого представляет собой двухполюсный постоянный магнит. Обмотка приемника имеет три фазы, помещающиеся в равномерно распределенных пазах статора. При медленном вращении щеток датчика будет происходить плавное изменение напряжения на фазах приемника и ротор его будет поворачиваться также плавно.

Благодаря тому, что ротор приемника намагничен, он будет иметь одно устойчивое положение в пределах оборота, и поэтому система будет обладать способностью к самосинхронизации. Это значит, что в каком бы положении ни находился ротор приемника до включения питания, после включения питания он будет занимать вполне определенное, синхронное с датчиком, положение.

При поворотах оси датчика в ту или другую сторону на тот или иной угол, ротор приемника будет поворачиваться в ту же сторону и на тот же угол, что и датчик.

В заключение дадим оценку рассмотренным системам синхронной связи на постоянном токе.

Системы с двумя и тремя электромагнитами давно уже устарели и вышли из употребления. Трехпроводная и четырехпроводная системы синхронной передачи в настоящее время применяются только в тех случаях, когда нет других источников питания, кроме постоянного тока.

Недостатками систем являются:

1. Отсутствие самосинхронизации и необходимость вследствие этого согласовывать систему перед началом работы, что создает значительные трудности на практике.

2. Большие статические ошибки даже индикаторных систем синхронной связи из-за неравномерного хода приемников. Неравномерность хода приемников в схемах автоматического регулирования не только приводит к ошибкам, но и создает колебательные процессы.

3. Сложность конструкции датчика и плохая коммутация на его щетках, что ограничивает мощность этих систем. Плохая коммутация приводит к обгоранию датчиков.

4. Резкое уменьшение синхронизирующего момента приемника при увеличении скорости его вращения, что ограничивает рабочую скорость вращения систем и делает их при вращении малоустойчивыми. Применение балластных сопротивлений хотя и дает возможность увеличить синхронизирующий момент при вращении, однако приводит к увеличению потребляемой системой мощности и тока.

Потенциометрическая система синхронной передачи является более совершенной и не имеет многих из вышеперечисленных недостатков систем постоянного тока, хотя и ей присущи некоторые недостатки, к которым относятся: 1) значительные потери мощности в потенциометре; 2) неадекватность контакта щеток потенциометра, особенно при работе в динамическом режиме.

Системы синхронной связи на переменном токе. В 1896 г. фирмой Симеис был получен патент на устройство для передачи движений, которое по существу является системой синхронной связи на однофазном переменном токе. Схема этого устройства приведена на рис. 15. Основ-

ными элементами устройства являются индукционные машины с однофазными первичными обмотками возбуждения t и t_1 , включаемыми в одну и ту же сеть переменного тока, и многофазными вторичными обмотками синхронизации a, b, c и соответственно a_1, b_1, c_1 , соединенными друг с другом. При неодинаковом положении осей обмоток синхронизации относительно осей обмоток возбуждения t и t_1 возникают уравнительные токи и вращающий момент, стремящийся установить роторы обеих машин в согласованное положение. Индукционные машины, применяемые по этой схеме, в дальнейшем получили название селсинов. Система синхронной связи на

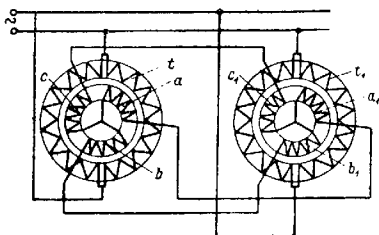


Рис. 15. Схема системы синхронной связи фирмы Сименс.

однофазном переменном токе впервые была применена в 1913 г. в русском военном флоте на линейном корабле „Андрей Первозванный“ и учебном судне „Рында“ в машинном телеграфе, служащем для передачи команд о ходе корабля из постов управления в машинное отделение. В том же году селсины стали использоваться фирмой ДЖИИ (США) на Панамском канале для указания в постах управления положения различных щитов, шлюзовых ворот, поплавков, измеряющих уровень воды, и т. д.

В 1914—1915 гг. селсины стали применяться в котельных телеграфах на эскадренных миноносцах русского флота и машинных телеграфах на линейных кораблях. С тех пор они начали использоваться все шире и в настоящее время находят применение почти во всех областях техники.

Коротко остановимся на истории развития конструктивных форм селсинов.

В 1901 г. проф. Тирман предложил „Устройство для передачи движений“ (патент DRP №137780), общий вид которого представлен на рис. 16. Это устройство представляет собой не что иное, как бесконтактный селсин, включающий в себя неподвижную катушку возбуждения I , статор 2 и ротор,

состоящий из оси 3 и двух Г-образных сердечников 4. Внутри катушки возбуждения помещается сердечник 5, через который проходит магнитный поток в осевом направлении. Пакет статора собирается из кольцеобразных пластин и на него накладывается фазная обмотка 6 в виде тороидальной обмотки. Эта конструкция имеет ряд существенных недостатков: большой воздушный зазор между Г-образными сердечниками и внутренним диаметром пакета статора, вызванный

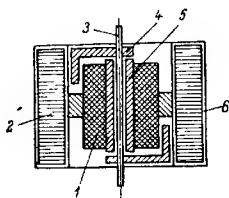


Рис. 16. Селсин системы проф. Тирмана.

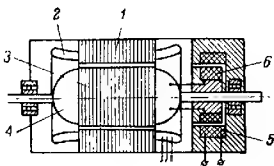


Рис. 17. Селсин с кольцевым трансформатором.

тем, что в зазоре помещаются проводники обмотки синхронизации; дополнительный воздушный зазор между сердечником 5 и Г-образными сердечниками 4; магнитный поток проходит поперек шихтовки в сердечнике статора; наличие в каждой половине статора только одного полюса, что приводит к плохому использованию длины машины.

Указанные недостатки явились причиной того, что селсины развивали ничтожные синхронизирующие моменты и широкого применения не нашли.

Вскоре после появления селсина проф. Тирмана было взято несколько патентов на синхронные передачи движений с неограниченным углом поворота, в которых питание к обмотке, расположенной на роторе, подавалось не при помощи контактных колец, а при помощи кольцевого трансформатора. На рис. 17 представлена схема одного из таких селсинов (патент DRP №405156). Селсин состоит из статора 1 с обмоткой синхронизации 2, ротора 3 с обмоткой возбуждения 4 и кольцевого трансформатора. Кольцевой трансформатор в свою очередь состоит из неподвижной первичной обмотки 5 и вращающейся вместе с ротором вторичной обмотки 6, включенной на обмотку возбуждения 4.

Основными недостатками этого бесконтактного селсина является наличие двукратной трансформации тока и сложность конструкции кольцевого трансформатора. Двойная трансформация сильно увеличивает потери в меди, реактивную мощ-

ность для намагничивания и размеры самого селсина, так как кольцевой трансформатор должен обладать мощностью, достаточной для питания обмотки возбуждения.

На рис. 18 представлено устройство бесконтактного селсина, предложенного в 1913 г. Пакет статора 1 с пазами для обмотки синхронизации 4 разделен на две части (участки *аб* и *вг*), между которыми помещается сердечник, собираемый из кольцеобразных пластин. Обмотка возбуждения 2, имеющая форму кольца, помещается по длине между двумя частями пакета статора и по диаметру между обмоткой синхронизации и кольцевым сердечником. Ротор 3 селсина представляет собой з-образный сердечник.

Данный селсин имеет несколько лучшие показатели, чем селсин системы проф. Тирмана, так как не имеет большого воздушного зазора между ротором и статором и дополнительных воздушных зазоров. Однако статор селсина также плохо используется по длине, а магнитный поток у него проходит поперек шихтовки в кольцеобразном сердечнике, как и у селсина системы проф. Тирмана. Все перечисленные выше селсины из-за наличия тех

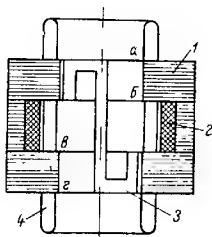


Рис. 18. Бесконтактный селсин с з-образным ротором.

или иных крупных недостатков широкого применения не получили и до второй мировой войны почти исключительно применялись селсины с контактными кольцами и щетками. Применяемые в то время контактные селсины по конструкции можно подразделить на две группы: а) селсины с обмоткой возбуждения на статоре (широко применялись в СССР, Германии); б) селсины с обмоткой возбуждения на роторе (получили распространение в США). Устройство магнитной цепи этих селсинов показано на рис. 19, а, б.

Контактные селсины имели высокие показатели по точности, синхронизирующему моменту и т. д. Однако они не обладали достаточной надежностью в работе, а поэтому не могли полностью удовлетворить требованиям практики. В 1938 г. работниками ВЭИ А. Г. Иосифьяном и Д. В. Свечарником были предложены бесконтактные селсины, которые выгодно отличались от имевшихся ранее бесконтактных селсинов и при сравнительно небольших размерах обеспечивали возможность получения достаточных синхронизирующих моментов.

Устройство бесконтактного селсина ВЭИ показано на рис. 20. Этот селсин состоит из статора 1, в пазах которого помещается обмотка синхронизации 2; ротора, состоящего из двух магнитопроводов 3, 4, разделенных немагнитным

промежутком 5; двух кольцеобразных катушек возбуждения 6; П-образного внешнего магнитопровода 7. Прохождение магнитного потока в селсине показано на рисунке жирной линией. В бесконтактном селсине ВЭИ, в отличие от ранее предло-

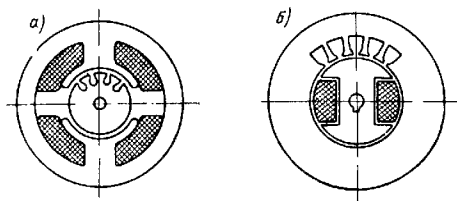


Рис. 19. Магнитная цепь селсинов: а) фирмы Сименс с обмоткой возбуждения на статоре; б) ДЖИИ с обмоткой возбуждения на роторе.

женных селсинов, длина статора используется полностью и нигде магнитный поток не проходит поперек шихтовки.

Бесконтактные селсины ВЭИ благодаря своим хорошим техническим показателям и надежности в работе нашли широкое применение и в настоящее время постепенно вытесняют контактные селсины.

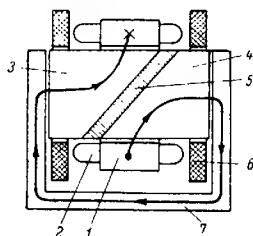


Рис. 20. Бесконтактный селсин ВЭИ.

В 1952—1953 гг. было предложено несколько конструктивных форм ротора бесконтактного селсина, две из которых показаны на рис. 21 и 22. В данных конструкциях разделение ротора в магнитном отношении на две части производится не посредством немагнитного промежутка, а при помощи короткозамкнутого витка, препятствующего прохождению через его плоскость пульсирующего магнитного потока.

Ротор, изображенный на рис. 21, состоит из пакета 1,

собираемого из целых пластин стали, идущих вдоль ротора из одного конца в другой, и медного витка 2, помещающегося в пазах пакета.

Ротор, приведенный на рис. 22, имеет более сложное устройство: состоит из трех пакетов с поперечной шихтовкой 1, 2 и 3, которые соединяются между собой при помощи двух пакетов 4 и 5, имеющих продольную шихтовку. Кроме

того, на роторе имеется несколько короткозамкнутых обмоток. Виток 6 служит для разделения ротора в магнитном отношении на две части. Виток 7, помещающийся в пазах центрального пакета, и витки 8 и 9, имеющие форму вось-

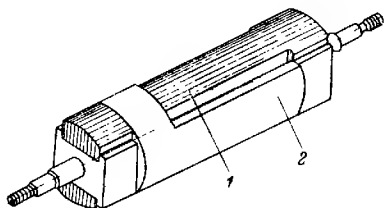


Рис. 21. Ротор бесконтактного селсина с короткозамкнутым витком.

мерки и охватывающие продольные стержни, служат для улучшения параметров селсина в поперечной оси и для демпфирования колебаний ротора.

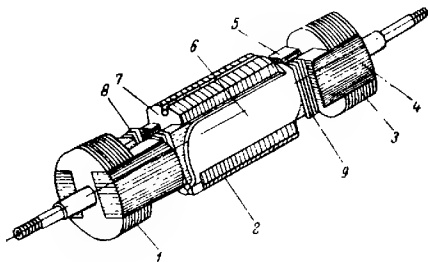


Рис. 22. Трехпакетный ротор с короткозамкнутым витком.

Необходимо указать, что при нормальной частоте сети (50 гц) роторы с короткозамкнутыми витками малоэффективны и могут быть применены только при повышенной частоте сети (400—500 гц).

В 1939 г. И. Д. Садовским было получено авторское свидетельство № 56183 на бесконтактный селсин, устройство которого показано на рис. 23. Селсин состоит из двух имеющих общий корпус машин, в каждой из которых свои пакеты статора и ротора, обмотки статора и ротора. Машинны изго-

тавливаются на различное число полюсов. Роторные обмотки выполняются как многофазные и включаются друг на друга. Питание подается на обмотку одного из статоров, и она служит обмоткой возбуждения; обмотка же на втором статоре служит в качестве обмотки синхронизации. Если выполнить одну из машин с числом пар полюсов $P=1$, а вторую $P=2$, то напряжение обмотки синхронизации U_2 будет изменяться от угла поворота α по уравнению

$$U_2 = U_\phi \sin (2\alpha \pm \alpha).$$

При согласном включении обмоток роторов перед вторым членом в скобках берется знак плюс и получается

$U_2 = U_\phi \sin 3\alpha$, а при встречном включении обмоток роторов — знак минус и получается

$$U_2 = U_\phi \sin \alpha.$$

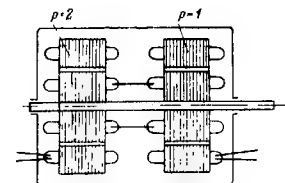


Рис. 23. Селсин конструкции И. Д. Садовского.

с различным числом пар полюсов можно укладывать в одни и те же пазы статора и ротора. Это было учтено И. Д. Садовским в новой конструкции бесконтактного селсина (авторское свидетельство № 65902). Основным недостатком обоих вариантов селсина является наличие двукратной трансформации, что делает их малоэффективными при нормальной частоте (50 гц). Однако, при повышенных частотах, и особенно для трансформаторного режима данные селсины могут работать удовлетворительно и иметь большую точность.

В 1942 г. в американском дистанционном компасе фирмы „Пионер“ впервые была применена синхронная передача на однофазном переменном токе, основными элементами которой являются специальные электрические машины, получившие название магнесинов. Схема синхронной передачи, состоящей из магнесина-датчика и магнесина-приемника, приведена на рис. 24. Статоры магнесинов набираются в виде пакетов из колец пермаллоя, на которые равномерно наматывается тороидальная обмотка. Концы обмотки 1, 4 включаются в сеть переменного тока. При помощи двух дополнительных отводов 2, 3 обмотки делятся на три части. Эти отводы датчика и приемника соединяются между собой. Ротор магнесина

представляет собой постоянный магнит с двумя полюсами S , N . При подаче на обмотку магнесина питания от сети с частотой f в сердечнике статора благодаря подмагничивающему действию ротора возбуждаются магнитные потоки, пульсирующие с частотой f и $2f$, которые индуктируют в обмотках э. д. с. соответственно с частотой f и $2f$. Э. д. с. основной частоты имеет одинаковую величину во всех секциях обмотки и остается постоянной при изменении положения ротора,

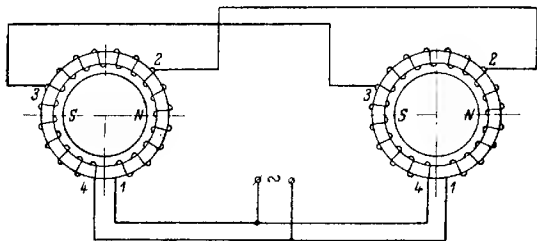


Рис. 24. Схема синхронной передачи с магнесинами.

а величина э. д. с. двойной частоты зависит от расположения магнитной оси ротора относительно оси секции обмотки. Поэтому э. д. с. основной частоты, индуктируемые в отдельных частях обмоток датчика и приемника, всегда равны по величине и взаимно компенсируют друг друга, а э. д. с. двойной частоты равны друг другу и компенсируются только при согласованном положении роторов датчика и приемника. При рассогласовании положения системы возникают уравнивающие токи двойной частоты и синхронизирующий момент, который поворачивает ротор приемника и устанавливает его в согласованное с датчиком положение. Преимуществом магнесинов является отсутствие в них контактов и простота конструкции. Основным же их недостатком является то, что они развивают на оси незначительный (по сравнению с селсинами) синхронизирующий момент.

Магнесины нашли применение в авиационных приборах.

Глава I

СИНХРОННЫЕ ПЕРЕДАЧИ НА ОДНОФАЗНОМ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

§ 3. УСТРОЙСТВО ЭЛЕМЕНТОВ СИНХРОННОЙ ПЕРЕДАЧИ НА ОДНОФАЗНОМ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

В системах синхронной связи на однофазном переменном токе в качестве датчика и приемника применяются электрические индукционные машины, которые имеют однофазные обмотки возбуждения, включаемые в одну и ту же сеть переменного тока, и трехфазные обмотки синхронизации, подключаемые друг к другу. Индукционные машины, применяемые в однофазной синхронной передаче, называются селсинами, что означает на английском языке „самосинхронизирующийся“ (self synchron). На русском языке правильно было бы вместо слова селсин применять слово самосин. Однако, учитывая, что слово селсин получило в отечественной технической литературе широкое распространение, мы в настоящей работе также будем пользоваться этим термином.

Селсин, применяемый в качестве датчика, называют селсином-датчиком, а применяемый в качестве приемника — селсином-приемником.

Обмотки возбуждения селсинов чаще всего располагаются на явновыраженных полюсах, реже в равномерно распределенных по окружности пазах. Трехфазные обмотки синхронизации всегда располагаются в распределенных пазах. Датчики и приемники синхронной передачи на однофазном переменном токе с целью обеспечить самосинхронизацию в пределах полного оборота выполняются только двухполюсными.

В настоящем параграфе даются лишь самые общие сведения об устройстве селсинов. Более же подробно этот вопрос освещается в главе VI.

На рис. 25 показано устройство одного из видов селсина. На оси 1 помещается пакет 6 ротора с двумя явновыраженными полюсами, на которые наматывается обмотка возбуждения 5. Концы обмотки возбуждения подводятся к двум контактным кольцам 3, по каждому из которых ходят щетки 13. Питание обмотки возбуждения осуществляется через эти щетки и контактные кольца. Ротор селсина вращается на двух шарикоподшипниках 2, 7, установленных в крышках 4 и 8.

В корпусе 11 селсина помещается пакет статора 9 с равномерно распределенными пазами, в которых помещается трехфазная обмотка 10. На рисунке статор условно показан с шестью пазами. Оси фазных обмоток сдвинуты относительно

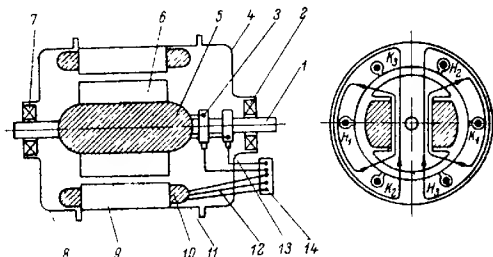


Рис. 25. Устройство контактного селсина.

друг друга в пространстве на 120° . Фазные обмотки соединяются звездой. Начала фазных обмоток H_1, H_2, H_3 выводятся проводниками 12 на клеммную плату 14, а концы K_1, K_2, K_3 соединяются вместе.

При включении обмотки возбуждения в сеть переменного тока в машине возбуждается магнитный поток, пульсирующий с частотой сети. Прохождение магнитного потока для некоторого момента времени показано на рис. 25 в виде жирных линий со стрелками. Магнитный поток будет индутировать в фазных обмотках трансформаторные электродвижущие силы (э. д. с.), величина которых будет зависеть от взаимного расположения оси обмотки возбуждения и оси данной фазы. Э. д. с. будет иметь максимальную величину при совпадении оси фазной обмотки с осью обмотки возбуждения и равно нулю при смещении их осей на 90° . На рис. 26 приведены кривые зависимости э. д. с. фазных обмоток селсина от угла поворота ротора.

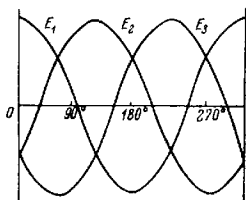


Рис. 26. Кривые зависимости э. д. с. фазных обмоток селсина от угла поворота ротора.

Для успокоения колебаний ротора селсины-приемники, как правило, снабжаются механическими или электрическими демпферами (успокоителями). Без них могут работать только

небольшие селсины-приемники, момент трения которых имеет относительно большую величину.

Механические демпферы состоят из маховика, насаживаемого на ось ротора приемника, и фрикционного устройства. При вращательных ускорениях в силу инерции маховика ось ротора поворачивается относительно маховика, а на оси селсина возникает дополнительный момент трения, который вносит затухание в систему. При установившемся режиме работы успокоитель вращается вместе с осью и не создает момента трения.

Электрические успокоители состоят из специальных короткозамкнутых обмоток, оси которых расположены так, что они не воздействуют на магнитный поток, создаваемый об-

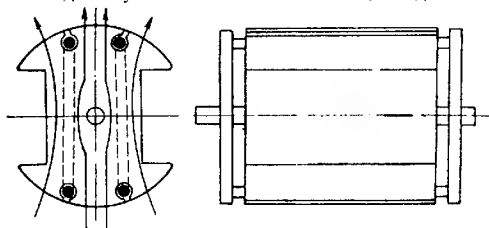


Рис. 27. Устройство демпферной обмотки.

моткой возбуждения. Очевидно, это может быть достигнуто только в том случае, если ось демпферной обмотки повернута в пространстве относительно оси обмотки возбуждения на 90° . При колебаниях ротора приемника в этой обмотке возникают электрические потери, которые покрываются за счет кинетической энергии движения ротора-приемника. Демпферная обмотка, уменьшая кинетическую энергию ротора, вводит в систему затухание.

Устройство демпферной обмотки, состоящей из двух самостоятельных короткозамкнутых изолированных витков ротора, показано на рис. 27. Каждый ее виток состоит из двух активных стержней, которые размещаются в пазах, расположенных на полюсах ротора, и двух перемычек, соединяющих стержни в торцевых частях ротора. Для простоты ротор показан на рис. 27 без обмотки возбуждения, наматываемой поверх демпферной обмотки.

Короткозамкнутые витки демпферной обмотки не препятствуют прохождению потока возбуждения, так как силовые линии потока проходят параллельно плоскости витков и не сцепляются с ними.

§ 4. ПРИНЦИП РАБОТЫ СИСТЕМЫ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ НА ОДНОФАЗНОМ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

Электрическая схема простейшей системы синхронной связи на однофазном переменном токе, состоящей из датчика и одного приемника, представлена на рис. 28. Обозначим через γ_1 и γ_2 углы установки роторов датчика и приемника. Отсчет углов будем производить от оси обмотки возбуждения в направлении против часовой стрелки. Углы γ_1 и γ_2 представляют собой углы между осью фазы A и осью обмотки возбуждения для датчика и приемника. Очевидно, угол $\theta = \gamma_1 - \gamma_2$ является углом рассогласования между роторами датчика и приемника. При подаче питания на обмотки возбуждения датчика и приемника в каждом из них возбуждается неподвижный в пространстве и пульсирующий во времени с частотой сети магнитный поток, который будет индуцировать в каждой из фаз синхронизирующих обмоток трансформаторные электродвижущие силы. Величины фазных электродвижущих сил будут зависеть от расположения оси фазы относительно оси магнитного потока. Величина фазных э. д. с. будет достигать максимума при совпадении оси фазы с осью магнитного потока и обратится в нуль при смещении оси фазы на 90° относительно оси магнитного потока.

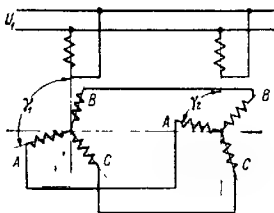


Рис. 28. Электрическая схема системы синхронной связи на однофазном токе.

Предполагая синусоидальное распределение магнитного потока в воздушном зазоре для величин фазных э. д. с. можно написать:

$$\left. \begin{aligned} E_{A_1} &= 4,44 f \Phi \omega k_w \cos \gamma_1 = E_\Phi \cos \gamma_1; \\ E_{B_1} &= 4,44 f \Phi \omega k_w \cos (\gamma_1 - 120^\circ) = E_\Phi \cos (\gamma_1 - 120^\circ) \\ E_{C_1} &= 4,44 f \Phi \omega k_w \cos (\gamma_1 + 120^\circ) = E_\Phi \cos (\gamma_1 + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

$$\left. \begin{aligned} E_{A_2} &= 4,44 f \Phi \omega k_w \cos \gamma_2 = E_\Phi \cos \gamma_2; \\ E_{B_2} &= 4,44 f \Phi \omega k_w \cos (\gamma_2 - 120^\circ) = E_\Phi \cos (\gamma_2 - 120^\circ) \\ E_{C_2} &= 4,44 f \Phi \omega k_w \cos (\gamma_2 + 120^\circ) = E_\Phi \cos (\gamma_2 + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

где E_{A_1} ; E_{B_1} ; E_{C_1} — фазные э. д. с. датчика;

E_{A_2} ; E_{B_2} ; E_{C_2} — фазные э. д. с. приемника;

ω , k_w — число витков и обмоточный коэффициент фаз приемника и датчика;

Φ — магнитный поток приемника и датчика;

E_Φ — максимальная величина фазной э. д. с.

Так как фазные э.д.с. датчика и приемника включены по схеме навстречу друг другу, то в цепи каждой фазы будет действовать результирующая э. д. с., равная разности фазных э. д. с. приемника и датчика:

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_A &= E_{A_2} - E_{A_1} = E_\phi (\cos \gamma_2 - \cos \gamma_1) = \\ &= 2E_\phi \sin \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{2} = 2E_\phi \sin \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin \frac{\theta}{2} \\ \Delta E_B &= E_{B_2} - E_{B_1} = E_\phi [\cos (\gamma_2 - 120^\circ) - \cos (\gamma_1 - 120^\circ)] = \\ &= 2E_\phi \sin \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} - 120^\circ \right) \sin \frac{\theta}{2} \\ \Delta E_C &= E_{C_2} - E_{C_1} = E_\phi [\cos (\gamma_2 + 120^\circ) - \cos (\gamma_1 + 120^\circ)] = \\ &= 2E_\phi \sin \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + 120^\circ \right) \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\} (4.3)$$

Уравнение (4.3) показывает, что все действующие в фазных цепях результирующие э.д.с. ΔE_A , ΔE_B и ΔE_C обращаются в нуль, когда угол рассогласования θ также равен нулю. Это значит, что когда углы установки роторов датчика и приемника γ_1 и γ_2 равны, т. е. фазные обмотки датчика и приемника занимают одинаковое положение относительно оси обмотки возбуждения, то в фазных цепях не будут протекать токи и на ротор не будет действовать какой-либо вращающий момент. При повороте же оси датчика на некоторый угол и установке его в любом другом положении угол θ не равен нулю, а в фазных цепях будут действовать результирующие э. д. с., которые вызовут появление уравнивающих токов.

В результате взаимодействия уравнивающих токов с потоком возбуждения на оси датчика и приемника возникают вращающие моменты, которые действуют в направлении уменьшения угла рассогласования. Так как ротор датчика связан с задающим механизмом и не обладает свободой вращения, то поворачивается всегда лишь ротор приемника. В каком бы положении ни находился ротор приемника до момента включения питания, после включения питания он поворачивается и занимает синхронное с ротором датчика положение, единственное в пределах одного оборота. Благодаря этому свойству система синхронной передачи на однофазном переменном токе с индукционными электрическими машинами в качестве датчика и приемника называется самосинхронизирующейся синхронной передачей, сокращенно ССП.

Благодаря свойству самосинхронизации, простоте конструкции датчика и приемника, высокой статической и динамической точности и хорошей коммутации самосинхронизирующаяся синхронная передача на однофазном переменном токе получила широкое применение. Без преувеличения можно сказать, что в настоящее время селсины применяются почти во всех отраслях техники и область их применения с каждым

днем растёт. Неоценима роль селсинов в деле автоматизации производственных процессов, при дистанционном управлении различными механизмами, установками и т. д. Системы синхронной связи на однофазном переменном токе, в основном, применяются для передачи угловых поворотов на расстоянии. Иногда они используются для вращения небольших вспомогательных нагрузок и очень редко — для поворота рабочих механизмов.

§ 5. УПРОЩЕННАЯ ТЕОРИЯ СИСТЕМЫ ПАРНОЙ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

В настоящем параграфе даются лишь общие сведения о работе селсинов с целью показать физические процессы, происходящие при этом (работа синхронной передачи на однофазном переменном токе на основе современной теории синхронных машин будет рассмотрена в гл. II). Мы будем рассматривать систему синхронной передачи, состоящую из датчика и одного приемника, функции которых выполняются двумя совершенно одинаковыми машинами. Причем, ограничимся рассмотрением статического режима работы селсинов при малом угле рассогласования, так как такой режим часто встречается на практике. С целью упростить задачу будем пренебрегать реакцией фазных токов на обмотку возбуждения, что (как будет показано дальше) вполне допустимо при малых углах рассогласования.

Из уравнения (4.3) видно, что результирующие напряжения, действующие в цепях фазных обмоток при неизменном угле рассогласования, зависят от полусуммы углов установки датчика и приемника $\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2}$.

Предположим, что обмотки синхронизации датчика и приемника занимают положение, соответствующее рис. 29, а, т. е.

$$\gamma_1 = 90^\circ + \frac{\theta}{2}; \quad \gamma_2 = 90^\circ - \frac{\theta}{2}.$$

Результирующие напряжения в фазных обмотках будут равны:

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{E}_A &= 2\dot{E}_\phi \sin \frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} \sin \frac{\theta}{2} = 2\dot{E}_\phi \sin \frac{\theta}{2} = \Delta \dot{E} \\ \Delta \dot{E}_B &= 2\dot{E}_\phi \sin \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} - 120^\circ \right) \sin \frac{\theta}{2} = \\ &= -\dot{E}_\phi \sin \frac{\theta}{2} = -\frac{\Delta \dot{E}}{2} \\ \Delta \dot{E}_C &= 2\dot{E}_\phi \sin \left(\frac{\gamma_1 + \gamma_2}{2} + 120^\circ \right) \sin \frac{\theta}{2} = \\ &= -\dot{E}_\phi \sin \frac{\theta}{2} = -\frac{\Delta \dot{E}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

Из уравнений видно, что результирующее напряжение в фазе *A* имеет максимальное значение для данного угла рассогласования, а в фазах *B* и *C* — половинное значение максимальной величины с отрицательным знаком. Для этого

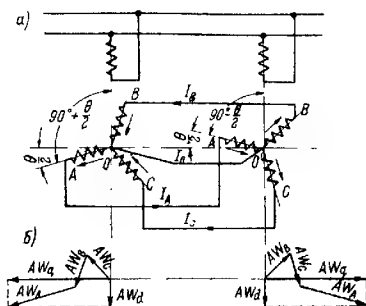


Рис. 29. Токи и м.д.с. датчика и приемника при рассогласовании на угол θ : *a* — направление тока в обмотках селсина; *б* — векторная диаграмма м.д.с.

положения уравнительные токи, протекающие в фазах, очевидно будут равны:

$$\left. \begin{aligned} j_A &= \frac{\Delta \dot{E}_A}{2z_q} = \frac{\dot{E}_\Phi}{z_q} \sin \frac{\theta}{2} \\ j_B &= \frac{\Delta \dot{E}_B}{2z_q} = -\frac{\dot{E}_\Phi}{2z_q} \sin \frac{\theta}{2} \\ j_C &= \frac{\Delta \dot{E}_C}{2z_q} = -\frac{\dot{E}_\Phi}{2z_q} \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\}, \quad (5.2)$$

где z_q — полное сопротивление фазы.

Ток в нулевом проводе будет равен:

$$j_0 = j_A + j_B + j_C = 0. \quad (5.3)$$

Отсюда следует, что нулевые точки обмоток датчика и приемника являются эквипотенциальными точками и нет никакой необходимости соединять их проводником. Нулевой провод, соединяющий точки *O* и *O*₁, показан на рис. 29, *a* с целью упростить пояснения.

На рис 29, б построены векторные диаграммы магнитодвижущих сил обмоток синхронизации датчика и приемника.

Как видно из рисунка, направление результирующей м. д. с. совпадает с направлением м. д. с. фазы A , по которой протекает максимальный ток, а по величине результирующая м. д. с. превышает м. д. с. фазы A в полтора раза. Величина результирующей м. д. с. будет равна

$$AW_p = \frac{3}{2} AW_A = \frac{3}{2} 1,8 \omega k_w I_A = 2,7 \frac{E_{\Phi} \omega k_w}{z_q} \sin \frac{\theta}{2}, \quad (5.4)$$

где ω и k_w — соответственно число витков и обмоточный коэффициент фазы обмотки синхронизации.

Разложим результирующие м. д. с. датчика и приемника по двум осям: по оси обмотки возбуждения и по оси, перпендикулярной ей. Первую ось мы будем называть продольной, а вторую — поперечной. Ампервитки, действующие по продольной оси будем называть продольными, а ампервитки, действующие по поперечной оси, поперечными ампервитками.

Продольные ампервитки равны:

$$\begin{aligned} AW_d &= AW_p \sin \frac{\theta}{2} = 2,7 \frac{E_{\Phi} \omega k_w}{z_q} \sin^2 \frac{\theta}{2} = \\ &= 1,35 \frac{E_{\Phi} \omega k_w}{z_q} (1 - \cos \theta). \end{aligned} \quad (5.5)$$

Поперечные ампервитки равны:

$$\begin{aligned} AW_q &= AW_p \cos \frac{\theta}{2} = 2,7 \frac{E_{\Phi} \omega k_w}{z_q} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} = \\ &= 1,35 \frac{E_{\Phi} \omega k_w}{z_q} \sin \theta. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Как видно из векторной диаграммы рис. 29, б и формул (5.5) — (5.6), при рассогласовании синхронной передачи в обмотках синхронизации протекают уравнивающие токи, которые создают продольные и поперечные ампервитки. Продольные ампервитки направлены навстречу ампервиткам обмоток возбуждения как датчика, так и приемника. Поперечные ампервитки образуют магнитный поток, ось которого сдвинута относительно потока возбуждения на 90° , т. е. направлена по поперечной оси. При малых углах рассогласования величина продольных ампервитков по сравнению с поперечными ампервитками ничтожно мала. Например, при $\theta = 5^\circ$

$$\frac{AW_d}{AW_q} = \frac{1 - \cos 5^\circ}{\sin 5^\circ} = 0,026.$$

Аналогично можно ввести понятие о продольном и поперечном токе, подразумевая под ними такие уравнивающие

токи, которые создают продольные и поперечные ампервитки. Очевидно, продольный ток будет равен

$$I_d = \frac{3}{2} I_A \sin \frac{\theta}{2} = \frac{3}{4} \frac{E_\Phi}{z_q} (1 - \cos \theta), \quad (5.7)$$

а поперечный ток

$$I_q = \frac{3}{2} I_A \cos \frac{\theta}{2} = \frac{3}{4} \frac{E_\Phi}{z_q} \sin \theta. \quad (5.8)$$

На рис. 30, а приведена векторная диаграмма продольной оси селсина датчика и приемника. По оси ординат направ-

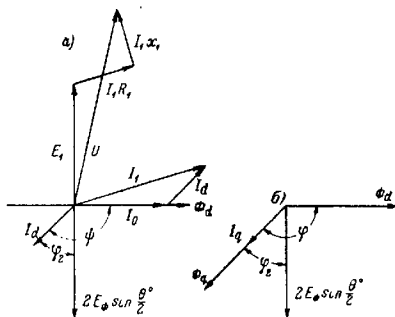


Рис. 30. Векторная диаграмма селсина: а — для продольной оси селсина-датчика, б — для поперечной оси.

лена составляющая напряжения сети, идущая на компенсацию э. д. с. обмотки возбуждения E_1 . Намагничивающий ток I_0 и магнитный поток Φ_d отстают от E_1 на 90° , а э. д. с. обмотки синхронизации E_Φ отстает от магнитного потока Φ_d также на 90° . Продольный ток отстает от э. д. с. E_Φ на некоторый угол φ_2 , который определяется активной и реактивной частью сопротивления z_q . Первичный ток I_1 складывается из двух составляющих: тока холостого хода I_0 , имеющего место при угле $\theta = 0$, и тока I_d , идущего на компенсацию продольных ампервитков обмотки синхронизации. Как видно из рис. 30, а, векторная диаграмма продольной оси селсина полностью аналогична векторной диаграмме двухобмоточного трансформатора. Роль тока нагрузки вторичной обмотки трансформатора выполняет продольный ток I_d .

На рис. 30, б приведена векторная диаграмма поперечной оси селсиа датчика и приемника. Поперечный ток I_q имеет ту же фазу, что и продольный I_d , так как они являются геометрическими проекциями одного и того же тока I на поперечную и продольную ось. В поперечной оси м. д. с. и поток создают только ток I_q . Поток Φ_q совпадает по фазе с током I_q .

Как видно из рис. 29, б, при малых углах рассогласования уравнивающий ток имеет максимальное значение в фазе А, ось которой направлена почти по поперечной оси, и вся обмотка синхронизации создает, в основном, поперечные ампервитки. Поэтому под сопротивлением z_o , которое применялось

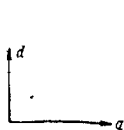


Рис. 31. Положительные направления осей d и q .

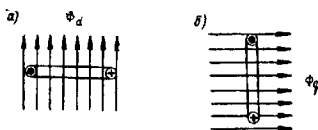


Рис. 32. Электромагнитные силы, возникающие при взаимодействии: а — продольного потока с витком, ось которого совпадает с осью d ; б — поперечного потока с витком, ось которого совпадает с осью q .

в уравнениях (5.7) — (5.8), следует понимать полное сопротивление одной фазы обмотки синхронизации при совпадении оси фазы с поперечной осью. Как известно из теории синхронных машин, это сопротивление называется поперечным сопротивлением фазы.

Рассмотрим синхронизирующий момент. За положительные направления продольной оси d и поперечной оси q примем направления, указанные на рис. 31. Ампервитки и токи будем считать положительными, если они создают магнитные потоки, направленные в положительном направлении оси d или q .

За положительное направление угла поворота и вращающего момента примем направление против часовой стрелки.

На рис. 32, а представлен продольный магнитный поток с витком, по которому протекает ток, создающий положительные продольные ампервитки, а на рис. 32, б — поперечный магнитный поток и виток с током, создающий положительные поперечные ампервитки. Из рисунков видно, что как при взаимодействии продольного потока с витком, создающим продольные ампервитки, так и при взаимодействии поперечного потока с витком, создающим поперечные ампервитки, вращающий момент не образуется.

На рис. 33, а показан продольный магнитный поток, в котором помещается виток с током, создающим положительные поперечные ампервитки, а на рис. 33, б — поперечный магнитный

поток и виток с током, создающим положительные продольные ампервитки. По закону Ампера определяются направление и величина силы, действующей на виток. Из этого рисунка видно, что в результате взаимодействия продольного потока с витком, создающим поперечные ампервитки, и поперечного потока с витком, создающим продольные ампервитки, образуются вращающие моменты, причем в первом случае момент положителен, а во втором — отрицателен.

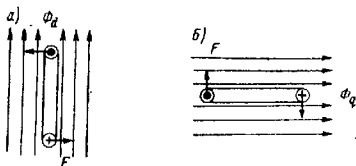


Рис. 33. Электромагнитные силы, возникающие при взаимодействии: a — продольного потока с витком, ось которого направлена по оси q ; b — поперечного потока с витком, ось которого направлена по оси d .

Следовательно, результирующий синхронизирующий момент равен:

$$M = k_1 (\Phi_d A W_q - \Phi_q A W_d) = k_2 (\psi_d I_q - \psi_q I_d). \quad (5.9)$$

Для малых углов рассогласования θ можно принять $A W_d = 0$, тогда синхронизирующий момент будет равен:

$$M = k_{1d} \Phi A W_q. \quad (5.10)$$

Для синусоидально распределенных и пульсирующих во времени магнитного потока и ампервитков величина момента может быть определена из формулы:

$$M = -\frac{\pi}{8} \cdot \frac{10^{-3}}{9.81} \Phi_d A W_q \cos \psi \text{ гс.м}, \quad (5.11)$$

где Φ_d — магнитный поток;

$A W_q$ — ампервитки на пару полюсов;

ψ — угол сдвига между Φ_d и $A W_q$.

В нашем случае имеем:

$$\Phi_d = \frac{E_\Phi 10^8}{\pi \sqrt{2} \omega k_{wf}}; \quad (5.12)$$

$$A W_q = 1.35 \frac{E_\Phi \omega k_w}{\sqrt{r_q^2 + x_q^2}} \sin \theta; \quad (5.13)$$

$$\cos \psi = -\sin \varphi_2 = -\frac{x_q}{\sqrt{r_q^2 + x_q^2}}, \quad (5.14)$$

где r_q и x_q — активная и реактивная составляющие полного сопротивления по поперечной оси q .

Подставляя Φ_d , AW_q и $\cos \psi$ в уравнение (5.11), получим

$$M = \frac{1217}{f} E_{\Phi}^2 \frac{x_q}{r_q^2 + x_q^2} \sin \theta \cdot \text{зс.м.} \quad (5.15)$$

Ввиду малости θ принимаем $\sin \theta \approx \theta$, тогда

$$M = \frac{1217}{f} E_{\Phi}^2 \frac{x_q}{r_q^2 + x_q^2} \theta. \quad (5.16)$$

Отсюда находим удельный момент приемника

$$m_0 = \frac{M}{\theta} = \frac{1217}{f} E_{\Phi}^2 \frac{x_q}{r_q^2 + x_q^2} \frac{\text{зс.м.}}{\text{радиан}}. \quad (5.17)$$

Переходя на угловые градусы, получим:

$$m_0 = \frac{1217}{f} \cdot \frac{\pi}{180} \cdot E_{\Phi}^2 \cdot \frac{x_q}{r_q^2 + x_q^2} = \frac{21,2}{f} E_{\Phi}^2 \frac{x_q}{r_q^2 + x_q^2} \cdot \frac{\text{зс.м.}}{\text{град}}. \quad (5.18)$$

Из рисунка 29, б видно, что поперечные ампервитки приемника положительные, а датчика отрицательны. Следовательно, синхронизирующий и удельный моменты датчика будут также отрицательными.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. При согласованном положении синхронной передачи на однофазном переменном токе как в датчике, так и в приемнике существует только продольный магнитный поток.

2. При рассогласовании приемника относительно датчика в обмотках синхронизации возникают уравнивательные токи, которые создают ампервитки, направленные как по поперечной, так и по продольной осям. Продольные ампервитки направлены навстречу ампервиткам обмоток возбуждения датчика и приемника, и их действие компенсируется увеличением тока возбуждения. Поперечные ампервитки создают поперечный магнитный поток. В результате взаимодействия поперечных ампервитков с продольным потоком и продольных ампервитков с поперечным потоком на оси приемника и датчика возникают вращающие синхронизирующие моменты, которые стремятся повернуть ось приемника и датчика так, чтобы они занимали относительно друг друга синхронное положение.

3. При малых углах рассогласования уравнивательный ток в обмотках синхронизации селсинов, преимущественно, образует поперечные ампервитки, а синхронизирующий момент, в основном, создается за счет взаимодействия поперечных ампервитков с продольным потоком.

Так как поперечный поток Φ_q создается поперечными ампервитками AW_q , то при $AW_q = 0$ Φ_q также равен нулю.

Поэтому из формулы (5.9) следует, что неизменным условием появления синхронизирующего момента является наличие поперечных ампервитков. Поэтому, если уравнивающий ток, протекающий по обмотке синхронизации, не создает поперечных ампервитков, то момент на оси селсинов равен нулю.

Для пояснения этого рассмотрим работу синхронной передачи, состоящей из одного датчика и одного приемника, в случае неравенства максимальных э. д. с. их фазных обмоток. Пусть угол рассогласования между датчиком и приемником равен нулю и их фазные обмотки занимают положение, указанное на рис. 34, а. Результирующие э. д. с. в фазных цепях будут равны:

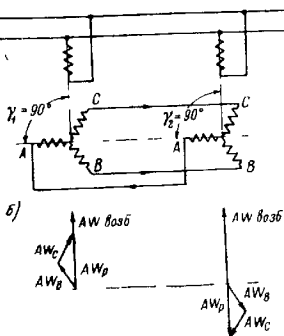


Рис. 34. Токи и м.д.с. синхронной передачи при неравенстве вторичных напряжений: а — направление тока в обмотках селсинов; б — векторная диаграмма м.д.с.

$$\left. \begin{aligned} \Delta E_A &= E_{\phi_2} \cos 90^\circ - E_{\phi_1} \cos 90^\circ = 0 \\ \Delta E_B &= E_{\phi_2} \cos 30^\circ - E_{\phi_1} \cos 30^\circ = +0,867 (E_{\phi_2} - E_{\phi_1}) \\ \Delta E_C &= E_{\phi_2} \cos 210^\circ - E_{\phi_1} \cos 210^\circ = -0,867 (E_{\phi_2} - E_{\phi_1}) \end{aligned} \right\}, \quad (5.19)$$

где E_{ϕ_2} и E_{ϕ_1} — максимальные фазные э. д. с. приемника и датчика.

Уравнивающие токи, протекающие в фазных цепях, равны:

$$I_A = 0; \quad I_B = +0,867 \frac{E_{\phi_2} - E_{\phi_1}}{2z_d}; \quad I_C = -0,867 \frac{E_{\phi_2} - E_{\phi_1}}{2z_d}, \quad (5.20)$$

где z_d — продольное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки. Причина замены здесь z'_q на z_d (см. уравнение 5.2) поясняется ниже.

При таком положении роторов датчика и приемника, когда угол между осями обмотки возбуждения и фазы А равен

не 90° , а некоторому значению γ_1 . вместо формул (5.20) получим выражения:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{\Delta E}{2z_d} \cos \gamma_1 \\ I_B &= \frac{\Delta E}{2z_d} \cos (\gamma_1 - 120^\circ) \\ I_C &= \frac{\Delta E}{2z_d} \cos (\gamma_1 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}. \quad (5.20')$$

На рис. 34, б построена векторная диаграмма фазных ампервитков для случая, когда фазное напряжение приемника E_{Φ_2} больше фазного напряжения датчика E_{Φ_1} . На этом рисунке, кроме фазных ампервитков AW_B , AW_C и результирующих ампервитков AW_p , указаны ампервитки обмотки возбуждения датчика и приемника. Из рисунка видно, что результирующие ампервитки являются чисто продольными и направлены против ампервитков обмотки возбуждения в селсине с большим фазным напряжением и — согласно с ампервитками обмотки возбуждения в селсине с меньшим фазным напряжением. Из этого следует, что возникающий уравнивающий ток размагничивает селсин с большим напряжением и намагничивает селсин с меньшим напряжением, благодаря чему выравниваются фазные напряжения. Следует отметить, что векторная диаграмма, приведенная на рис. 34, б, аналогична векторной диаграмме двух параллельно включенных трансформаторов с различными вторичными э. д. с.

Использование z_d в уравнениях (5.20) вызвано тем, что результирующие ампервитки действуют по продольной оси.

Как было сказано выше (см. выражения 5.9), синхронизирующий момент создается благодаря взаимодействию продольных ампервитков с поперечным потоком и поперечных ампервитков с продольным потоком. Нетрудно видеть, что в нашем случае синхронизирующий момент равен нулю, так как $AW_q = 0$ и $\Phi_q = 0$. Следовательно, уравнивающий ток, протекающий в согласованном положении селсинов, благодаря неравенству фазных напряжений, не создает на оси датчика и приемника синхронизирующего момента.

§ 6. ДЕМПФИРОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ ПРИЕМНИКА В СИСТЕМАХ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ

Система синхронной связи может с успехом передавать угловые повороты, если переход от одного значения угла к другому происходит достаточно быстро, без колебаний. Как было показано в § 1 на примере механической аналогии синхронной передачи (рис. 2, б), при повороте оси датчика ротор приемника занимает новое синхронное положение не сразу,

а лишь только через некоторое время. В течение этого времени ротор приемника колеблется. Время от момента поворота оси датчика до момента принятия осью приемника нового положения называется временем успокоения, которое, как уже говорилось выше, является одним из важных показателей синхронной передачи. Чем меньше время успокоения, тем быстрее можно получить правильные показания на оси приемника. С целью уменьшить время успокоения приемник снабжается демпфирующим устройством.

Обычно демпфирующие свойства селсина-приемника определяются по характеру затухания колебаний ротора приемника после начального рассогласования на некоторый угол θ_0 .

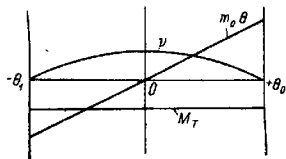


Рис. 35. Зависимости синхронизирующего момента (M_s) скорости вращения (v), момента трения (M_t) от угла рассогласования при колебаниях ротора приемника.

Посмотрим, какие же физические явления происходят при колебаниях ротора в период успокоения. Предположим, что при неподвижной оси датчика ось приемника повернула от синхронного положения на некоторый небольшой угол $+\theta_0$, а затем отпустили.

В самом начале скорость вращения ротора приемника будет равна нулю и на него будет действовать только синхронизирующий момент, равный $+m_s\theta_0$. Под воздействием этого момента ротор приемника начнет поворачиваться и скорость вращения его будет увеличиваться.

Достигнув синхронного положения, ротор здесь не остановится, хотя синхронизирующий момент в этом положении равен нулю, а по инерции будет продолжать поворачиваться дальше. Угол рассогласования между датчиком и приемником изменит свой знак, а с ним изменит направление и синхронизирующий момент, который с этого времени начнет замедлять скорость вращения ротора. Через некоторое время, достигнув угла $-\theta_1$, ротор остановится. В период движения ротора от $+\theta_0$ до $-\theta_1$ на него будет действовать момент сухого трения M_t , который направлен навстречу движению ротора.

Изменение всех указанных величин показано на рис. 35.

Вследствие того что при колебаниях ротор приемника приобретает некоторую скорость вращения, в обмотке синхронизации, кроме трансформаторных э. д. с., индуктируются э. д. с. вращения, которые создают асинхронный момент.

Рассматривая схему синхронной передачи, состоящую из датчика, ротор которого неподвижен, и одного приемника, ротор которого вращается с некоторой скоростью, мы можем

считать, что приемник представляет собой однофазный асинхронный двигатель, в фазные цепи которого в качестве добавочного сопротивления включена обмотка синхронизации датчика.

Возникновение асинхронных моментов в однофазном асинхронном двигателе легче всего пояснить на основе теории вращающихся полей, согласно которой пульсирующее поле можно представить как сумму двух вращающихся в разные стороны полей. Вращающиеся поля при неподвижном роторе создают одинаковые по величине и направленные в разные стороны моменты, в результате чего общий момент равен нулю. При вращении ротора величина моментов, создаваемых вращающимися полями, будет различной, и на валу ротора появится некоторый результирующий момент. Изменение величины моментов связано с тем, что при вращении меняется относительная скорость между вращающимися полями и ротором. Относительная скорость между ротором и полем, вращающимися в ту же сторону, что и ротор (прямое поле), уменьшается, а между ротором и полем, вращающимися в противоположную сторону (обратное поле), увеличивается.

Интересно отметить, что в зависимости от параметров фазной цепи ротора, результирующий момент на оси ротора может быть или положительным (направленным в сторону вращения ротора), или отрицательным (направленным в сторону, противоположную вращению ротора).

На рис. 36 представлены кривые моментов прямого поля M_1 , обратного поля M_2 и результирующий момент $M_{рез}$ в зависимости от скорости вращения ротора двигателя, в фазной цепи которого реактивное сопротивление превышает активное сопротивление $x > R$. Как видно из рисунка 36, положительным скоростям соответствуют положительные моменты, а отрицательным скоростям — отрицательные моменты. Такой двигатель не имеет пускового момента и не может сам прийти во вращение. Однако, если предварительно раскрутить его ротор, то двигатель в дальнейшем сможет сам поддерживать вращение. При этом он будет вращаться в ту сторону, в какую его раскрутят.

На рис. 37 представлены кривые зависимости моментов прямого поля M_1 , обратного поля M_2 и результирующего момента $M_{рез}$ от скорости вращения для двигателя, в фазной цепи которого активное сопротивление равно реактивному $r = x$.

Сравнивая кривые моментов прямого и обратного полей M_1 и M_2 (рис. 36 и 37), можно установить, что с увеличением активного сопротивления r фазной цепи точка максимального момента будет смещаться к точке нулевой скорости v . Об этом явлении говорится во всех курсах асинхронных машин.

Из рис. 37 видно, что при положительных скоростях результирующий момент отрицателен, а при отрицательных

скоростях положителен, т. е. момент всегда направлен против вращения. Ротор такой асинхронной машины, будучи раскрученным, не может поддерживать свое вращение, так как момент на его оси создает торможение.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что в однофазной синхронной передаче на оси селсина-приемника при его колебаниях возникает асинхронный момент, величина которого зависит от скорости вращения. В зависимости от соотношения активного и реактивного сопротивлений фазной цепи, асинхронный момент может совпадать с направлением вращения ротора или быть направленным в обратную сторону.

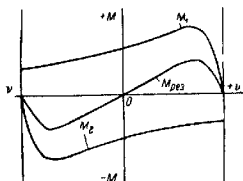


Рис. 36. Асинхронный момент однофазного двигателя при $x_2 > R_2$.

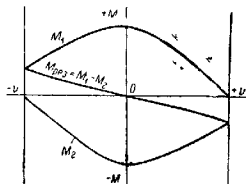


Рис. 37. Асинхронный момент однофазного двигателя при $x_2 = R_2$.

Колебания селсина-приемника аналогичны механическим колебаниям системы под действием упругой силы. Действительно, дифференциальное уравнение колебаний селсина-приемника имеет форму

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} \pm M_r = M_s, \quad (6.1)$$

где I — момент инерции ротора селсина-приемника;
 $\pm M_r$ — момент сухого трения, знак которого зависит от знака скорости;
 M_s — электромагнитный момент на валу селсина-приемника.

Электромагнитный момент приемника складывается из двух составляющих

$$M_s = M_s + M_a, \quad (6.2)$$

где $M_s = -T_s \theta$ — синхронизирующий момент, пропорциональный при малых углах рассогласования углу θ .

Очевидно, $T_s = +m_0$ (см. уравнение 5.17);

$M_a = -T_D \frac{d\theta}{dt}$ асинхронный (демпферный) момент, пропорциональный скорости вращения ротора селсина $\frac{d\theta}{dt}$.

Коэффициенты T_D и T_S называются коэффициентами демпферного и синхронизирующего моментов.

Синхронизирующий момент при $\theta < \pi$ всегда направлен в сторону уменьшения угла θ (поэтому в формуле для M_s поставлен знак минус). Демпферный момент может быть как положительным $T_D < 0$, так и отрицательным $T_D > 0$ по отношению к скорости вращения $\frac{d\theta}{dt}$. Это, как было показано, зависит от соотношения параметров селсина.

Подставляя выражение (6.2) в уравнение (6.1), получим

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + T_D \frac{d\theta}{dt} + T_S \theta = \pm M_r, \quad (6.3)$$

что и представляет собой дифференциальное уравнение системы, совершающей крутильные колебания.

Решение этого уравнения с учетом момента сухого трения рассматривается в § 24. Здесь же мы ограничимся разбором случая, когда $M_r = 0$. Тогда уравнение (6.3) является линейным и его решение при $T_S > \frac{T_D^2}{4I}$ имеет вид:

$$\theta = \theta_m e^{-\lambda t} \cos(\nu t + \varphi), \quad (6.4)$$

где $\lambda = \frac{T_D}{2I}$ — коэффициент затухания;

$\nu = \sqrt{\frac{T_S}{I} - \lambda^2}$ — угловая частота затухающих колебаний;
 θ_m, φ — амплитуда и фаза колебаний, зависящие от начальных условий.

Зависимость, выражаемая формулой (6.4) для $\lambda < 0$, графически показана на рис. 38. Как видно из полученных выражений, колебания приемника могут быть трех типов:

$\lambda > 0$; $T_D > 0$ — затухающие колебания;

$\lambda = 0$; $T_D = 0$ — незатухающие колебания;

$\lambda < 0$; $T_D < 0$ — колебания с возрастающей амплитудой: (раскачивание).

Затухание колебаний в селсинах в основном определяется асинхронным (демпферным) моментом

$$M_a = -T_D \frac{d\theta}{dt}.$$

Явление затухания колебаний селсина-приемника наглядно может быть пояснено на таком примере. Положим, что приемник имеет начальное рассогласование θ_0 и, следовательно, наподобие закрученной пружины, обладает потенциальной энергией $W_1 = T_S \frac{\theta_0^2}{2}$.

Если приемник отпустить, предоставив ему возможность совершать колебания, то потенциальная энергия его частично превратится в кинетическую энергию, а частично пойдет

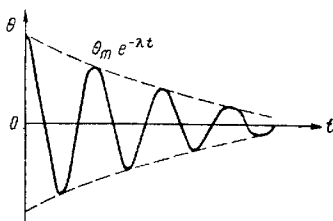


Рис. 38. Кривая затухания колебаний ротора приемника при согласовании.

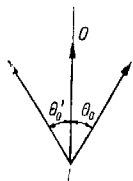


Рис. 39. Два последовательных отклонения ротора от согласованного положения.

на преодоление внешних сил. Через промежуток времени, равный полупериоду колебаний, приемник отклонится в другую сторону на угол θ'_0 (рис. 39). При этом его потенциальная энергия будет

равна $W_2 = T_S \frac{\theta_0^2}{2}$. Очевидно, колебания будут затухать, если $\theta'_0 < \theta_0$, и иметь возрастающую амплитуду, если $\theta'_0 > \theta_0$.

Установим условия, при которых данное явление будет иметь место. Для этого построим моменты, действующие на селсин-приемник, как функции угла рас-

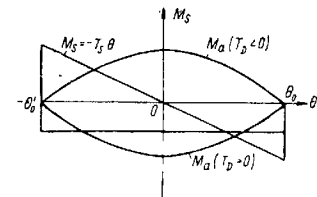


Рис. 40. Моменты, действующие на селсин-приемник при согласовании: M_S — синхронизирующий момент; M_A — асинхронный момент.

согласования (рис. 40). Согласно закону сохранения энергии, изменение потенциальной энергии приемника равно работе внешних сил

$$\Delta W = W_2 - W_1 = A_T + A_a, \quad (6.5)$$

где $A_T = -M_T(\theta_0 + \theta'_0)$ — работа сил трения, которая всегда отрицательна;

$$A_a = - \int_{\theta_0}^{\theta'_0} M_a d\theta \text{ — работа, совершаемая асинхронным моментом за время полупериода.}$$

Указанные выражения на рис. 40 имеют простой геометрический смысл: они численно равны площадям, ограниченным осью абсцисс и соответствующей кривой момента.

Из выражения (6.5) следует, что колебания будут затухающими, если $\Delta W < 0$ или $A_r + A_s < 0$, что означает, что суммарная работа, совершенная силами трения и асинхронным моментом за полупериод, должна быть отрицательна. В противном случае колебания будут незатухающими. У большинства селсинов, не имеющих демпферных обмоток на роторе, асинхронный момент положителен, а работа, совершаемая ими за полупериод, близка к работе сил трения. Такие селсины легко впадают в незатухающие колебания или затухают очень медленно. Чтобы обеспечить нормальную работу этих селсинов, их снабжают механическими демпферами, конструкция которых описана в главе VI. Однако, наличие механического демпфера может привести к ошибкам систем синхронной связи в динамических режимах. Поэтому более рациональным методом является электрическое демпфирование колебаний путем устройства специальных обмоток в селсине. Физические явления, происходящие при электрическом демпфировании, а также теория этого демпфирования рассмотрены в главе III.

Глава II

ТЕОРИЯ СИСТЕМ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

§ 7. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СИСТЕМ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ НА ОДНОФАЗНОМ ПЕРЕМЕННОМ ТОКЕ

При рассмотрении систем синхронной связи на однофазном переменном токе наибольшее распространение получили два метода анализа селсинов: метод вращающихся полей и метод двух реакций, лежащий в основе теории синхронных машин. В первом методе исследования селсин рассматривается как индукционная машина, в которой пульсирующее магнитное поле селсина разлагается на два вращающихся в противоположные стороны поля. Этот способ исследования весьма нагляден и позволяет использовать хорошо разработанный в теории асинхронных машин метод круговых диаграмм.

Наиболее полно метод вращающихся полей применительно к селсинам развит в работах Г. И. Штурмана [31, 32], Д. В. Васильева [3—9] и А. А. Городского [12].

Несмотря на сравнительную простоту общих принципов метода вращающихся полей, окончательные выражения для удельных и синхронизирующих моментов, получаемых на основе теории индукционных машин, имеют весьма сложный вид (особенно для явнополюсных селсинов), что затрудняет применение этих выражений на практике. Еще труднее пользоваться ими при анализе неустановившихся режимов в селсинах, например, малых колебаний.

При втором методе селсин рассматривается как синхронная машина, возбуждаемая переменным током. В качестве основных уравнений, описывающих процессы, происходящие в селсине, используются уравнения Горева-Парка для переходных режимов синхронной машины. Этот метод называют теорией двух реакций, поскольку в нем м. д. с. трехфазной синхронизирующей обмотки (реакция якоря) раскладывается на две составляющие по осям d и q , причем ось d совпадает с осью обмотки возбуждения селсина, а ось q ей перпендикулярна. Основное преимущество этого метода при анализе селсинов состоит в том, что в нем учитываются особенности магнитной цепи селсинов: наличие однофазной обмотки возбуждения на роторе и демпферной обмотки в поперечной оси,

а также трехфазной симметричной обмотки на статоре¹. Этот учет производится путем рационального выбора системы координат при составлении уравнений э. д. с. селсина, а именно: оси координат выбираются неподвижными по отношению к обмотке возбуждения, в данном случае оси координат связаны с вращающимся ротором. При таком выборе системы координат токи и э. д. с. в цепях селсина в установившемся режиме имеют одну и ту же частоту — частоту возбуждения. Это, естественно, значительно облегчает исследование такой сравнительно сложной системы, какой является селсин.

Первой фундаментальной работой по теории селсинов, основанной на применении метода двух реакций, была работа Линвилля и Вудворда [47], опубликованная в 1934 г. Однако, несмотря на простые исходные уравнения, окончательные результаты получили такое математическое оформление, что с трудом могли быть использованы на практике. Значительно более ясная физическая картина явлений и более простые выражения для синхронизирующих моментов даны в работах А. Г. Иосифьяна [14—20] и Л. Н. Грузова [13].

Дальнейшее развитие этот метод для анализа установившегося режима и малых качаний при согласовании селсинов получил в работе одного из авторов настоящей книги [34].

Положения настоящей главы основаны на применении второго метода исследования к теории селсинов.

§ 8. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИНХРОНИЗИРУЮЩЕЙ ОБМОТКИ В ЭКВИВАЛЕНТНУЮ ЕЙ ДВУХФАЗНУЮ

При питании обмотки возбуждения селсина от сети переменного тока в его трехфазной обмотке могут возникнуть токи (например, при рассогласовании в парной работе), которые будут оказывать воздействие на цепь возбуждения (реакция якоря). При установившемся режиме реакция трехфазной синхронизирующей обмотки по своему действию аналогична магнитному потоку обмотки возбуждения. Так, если магнитный поток обмотки возбуждения селсина пульсирует во времени по синусоидальному закону с частотой сети, то и э. д. с. трехфазной синхронизирующей обмотки пульсирует с той же частотой и неподвижна относительно обмотки возбуждения.

В предыдущей главе, рассматривая уравнительные токи, образовавшиеся вследствие неравенства э. д. с. фазных обмоток датчика и приемника, были получены следующие выра-

¹ Здесь и в дальнейшем будем считать, что синхронизирующая трехфазная обмотка расположена на статоре, а обмотка возбуждения — на роторе.

При обратном расположении обмоток все полученные результаты сохраняют силу, поскольку электромагнитные процессы в контурах зависят только от их взаимного расположения и относительного движения.

жения для фазных токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ в согласованных датчике и приемнике:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \frac{\Delta \dot{E}}{2z_d} \cos \gamma_1 \\ \dot{I}_B &= \frac{\Delta \dot{E}}{2z_d} \cos (\gamma_1 - 120^\circ) \\ \dot{I}_C &= \frac{\Delta \dot{E}}{2z_d} \cos (\gamma_1 + 120^\circ) \\ \Delta \dot{E} &= \dot{E}_{\phi_2} - \dot{E}_{\phi_1} \end{aligned} \right\}, \quad (8.1)$$

где γ_1 — угол, образуемый осью фазы A с осью обмотки возбуждения.

На рис. 34, б была представлена векторная диаграмма м. д. с. фазных обмоток и определена результирующая м. д. с. для частного случая положения фазных обмоток по отношению к обмотке возбуждения (см. рис. 34, а).

Как видно из формул (8.1), при таком повороте роторов датчика и приемника, когда угол рассогласования остается равным нулю, токи в фазах будут изменяться пропорционально $\cos \gamma$, $\cos (\gamma_1 - 120^\circ)$ и $\cos (\gamma_1 + 120^\circ)$. Эти токи создадут в расточке статора три м. д. с., пульсирующие во времени с частотой сети, оси которых в пространстве сдвинуты относительно друг друга на 120° . Амплитудные значения м. д. с. будут равны:

$$\begin{aligned} \dot{F}_A &= 0,9 \omega k_w \dot{I}_A = \dot{F}_m \cos \gamma_1; \\ \dot{F}_B &= 0,9 \omega k_w \dot{I}_B = \dot{F}_m \cos (\gamma_1 - 120^\circ); \\ \dot{F}_C &= 0,9 \omega k_w \dot{I}_C = \dot{F}_m \cos (\gamma_1 + 120^\circ), \end{aligned}$$

где ω — число витков фазы синхронизирующей обмотки;
 k_w — обмоточный коэффициент.

Результирующие м. д. с., действующие по продольной и поперечной осям селсина, равны сумме проекций фазных м. д. с. на соответствующие оси:

$$\begin{aligned} \dot{F}_d &= \dot{F}_A \cos \gamma_1 + \dot{F}_B \cos (\gamma_1 - 120^\circ) + \dot{F}_C \cos (\gamma_1 + 120^\circ) = \\ &= \dot{F}_m [\cos^2 \gamma_1 + \cos^2 (\gamma_1 - 120^\circ) + \cos^2 (\gamma_1 + 120^\circ)] = \frac{3}{2} \dot{F}_m; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{F}_q &= \dot{F}_A \sin \gamma_1 + \dot{F}_B \sin (\gamma_1 - 120^\circ) + \dot{F}_C \sin (\gamma_1 + 120^\circ) = \\ &= \dot{F}_m [\cos \gamma_1 \sin \gamma_1 + \cos (\gamma_1 - 120^\circ) \sin (\gamma_1 - 120^\circ) + \\ &\quad + \cos (\gamma_1 + 120^\circ) \sin (\gamma_1 + 120^\circ)] = 0, \end{aligned}$$

так как

$$\begin{aligned}\cos^2 \gamma_1 + \cos^2 (\gamma_1 - 120^\circ) + \cos^2 (\gamma_1 + 120^\circ) &= \frac{3}{2}; \\ \cos \gamma_1 \sin \gamma_1 + \cos (\gamma_1 - 120^\circ) \sin (\gamma_1 - 120^\circ) + \\ + \cos (\gamma_1 + 120^\circ) \sin (\gamma_1 + 120^\circ) &= 0.\end{aligned}$$

Это доказывает, что м. д. с. трехфазной обмотки от уравнительных токов, пульсируя во времени с частотой сети, направлена по оси обмотки возбуждения селсинов.

Точно так же можно показать, что продольные и поперечные составляющие м. д. с. синхронизирующей обмотки $\vec{F}_d$ и $\vec{F}_q$, возникающие при рассогласовании селсинов на некоторый угол $\theta - \gamma_1 - \gamma_2$, остаются неизменными, если одновременно поворачивать роторы датчика и приемника, сохраняя угол рассогласования.

При вращении роторов датчика и приемника с некоторой малой скоростью Ω уравнительные токи в фазах от неравенства э. д. с. могут быть записаны в виде:

$$\begin{aligned}i_A &= \frac{\Delta E_m}{2z_d} \sin \omega t \cos (\Omega t + \gamma_1); \\ i_B &= \frac{\Delta E_m}{2z_d} \sin \omega t \cos (\Omega t + \gamma_1 - 120^\circ); \\ i_C &= \frac{\Delta E_m}{2z_d} \sin \omega t \cos (\Omega t + \gamma_1 + 120^\circ),\end{aligned}$$

где ΔE_m — амплитудное значение разности фазных э. д. с. E_{ϕ_1} и E_{ϕ_2} .

Изменение тока i_A во времени при вращении селсина показано на рис. 41. Кривые токов i_B и i_C изменяются так же, как и i_A . Как видно из рис. 41, токи изменяются в фазах не по синусоидальному закону; их зависимость от времени в общем случае при любых скоростях вращения имеет весьма сложный характер.

Вышесказанное положение о характере м. д. с. трехфазной обмотки, очевидно, остается справедливым и при вращении обмотки возбуждения ротора с некоторой угловой скоростью относительно синхронизирующей обмотки. Несмотря на несинусоидальное изменение во времени токов в фазах синхронизирующей обмотки, составляющие м. д. с. F_d и F_q остаются при установившемся режиме неподвижными относительно обмотки возбуждения и пульсируют во времени с частотой сети. При этом в силу свойства симметрии трехфазной обмотки амплитуды составляющих м. д. с. не зависят от положения обмотки возбуждения по отношению к фазам трехфазной обмотки. Данное обстоятельство позволяет и в этом случае разложить м. д. с. синхронизирующей обмотки реального

селсина (рис. 42, а) на две составляющие по осям d и q , связанные неподвижно с ротором, т. е. рассматривать ее как м. д. с., создаваемую двумя неподвижными по отношению к ротору обмотками, расположенными по осям d и q (рис. 42, б).

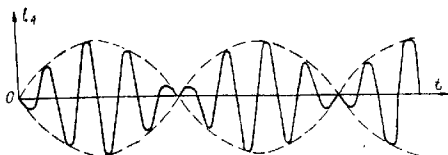


Рис. 41. Изменение фазного тока при вращении селсина.

Таким же путем может быть произведено разложение результирующего потокоцепления трехфазной обмотки.

М. д. с., создаваемая трехфазной синхронизирующей обмоткой, при условии, что м. д. с. каждой из фаз синусон-

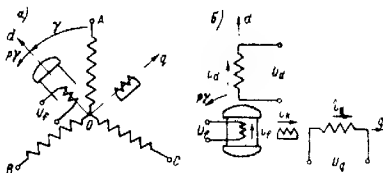


Рис. 42. Электрическая схема: а — реального селсина; б — селсина, приведенного к осям d и q .

дально распределена по расточке статора, может быть выражена формулой

$$F = \frac{2}{\pi} \omega k_w \left[i_A \cos \frac{\pi}{\tau} x + i_B \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi \right) + i_C \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{2}{3} \pi \right) \right], \quad (8.2)$$

где i_A , i_B , i_C — мгновенные значения токов в фазах синхронизирующей обмотки;

ω — число витков в фазе;

k_w — обмоточный коэффициент;

x — расстояние по расточке статора, отсчитываемое от оси фазы А.

Введем вместо фазных токов i_A , i_B и i_C токи i_d и i_q , связанные с ними соотношениями

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} \left[i_A \cos \gamma + i_B \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_C \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \\ i_q &= \frac{2}{3} \left[i_A \sin \gamma + i_B \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_C \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \end{aligned} \right\}, \quad (8.3)$$

и обратно

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma \\ i_B &= i_d \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + i_q \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) \\ i_C &= i_d \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) + i_q \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\}, \quad (8.4)$$

где γ — угол между осью фазы A и осью обмотки возбуждения d (см. рис. 42, a).

Тот факт, что вместо трех токов синхронизирующей обмотки i_A , i_B и i_C оказывается достаточным ввести только два тока, объясняется тем, что в селсинах трехфазная обмотка соединяется обычно звездой и поэтому $i_A + i_B + i_C = 0$, т. е. токи i_A , i_B , i_C не независимы друг от друга.

Геометрический смысл перехода от токов i_A , i_B , i_C к токам i_d и i_q в синхронных машинах выяснен А. А. Горевым. Применительно к селсинам в режиме поворота он сохраняется и состоит в следующем: м. д. с. трехфазной обмотки селсина синусоидально распределена по расточке машины и в установившемся режиме может быть изображена некоторым пространственным вектором, вращающимся вместе с ротором, но в отличие от пространственного вектора для синхронной машины, изменяющегося во времени по синусоидальному закону (рис. 43). Проектируя пульсирующий вектор на оси обмоток фаз F_A, F_B, F_C , мы получаем м. д. с. отдельных фаз и соответствующие им токи i_A , i_B и i_C . Если же проектировать этот вектор на оси d и q , связанные с ротором, то получаем м. д. с., создаваемые некоторыми фиктивными обмотками d и q соответственно с токами i_d и i_q .

Токи i_d и i_q изменяются по синусоидальному закону во времени, независимо от того, вращается ротор или нет, в то

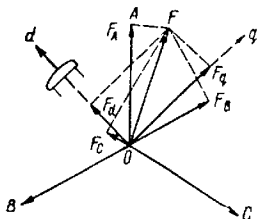


Рис. 43. Пространственная векторная диаграмма м.д.с. селсина.

время как фазные токи i_A, i_B и i_C являются синусоидальными функциями времени только при неподвижном роторе.

В этом состоит главное преимущество токов i_d и i_q по сравнению с фазными токами при построении теории селсинов.

Пользуясь формулами (8.4), можно выразить м. д. с. трехфазной обмотки через токи i_d и i_q :

$$F = \frac{2}{\pi} w k_w \left\{ i_d \left[\cos \frac{\pi}{\tau} x \cos \gamma + \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{2}{3} \pi \right) \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right] + i_q \left[\cos \frac{\pi}{\tau} x \sin \gamma + \right. \right. \\ \left. \left. + \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \frac{2}{3} \pi \right) \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x + \frac{2}{3} \pi \right) \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \right] \right\} = \frac{3}{\pi} w k_w \left[i_d \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \gamma \right) + i_q \sin \left(\frac{\pi}{\tau} x - \gamma \right) \right]. \quad (8.5)$$

Будем отсчитывать расстояние x не от оси фазы A , а от оси обмотки возбуждения d , вращающейся вместе с ротором, — расстояние x' . Очевидно $x = x' + \gamma \frac{\tau}{\pi}$, где τ — полюсное деление. Подставляя это выражение в формулу (8.5), получим

$$F = \frac{3}{\pi} w k_w \left(i_d \cos \frac{\pi}{\tau} x' + i_q \sin \frac{\pi}{\tau} x' \right). \quad (8.6)$$

Полученное выражение дает основание заявить, что трехфазная синхронизирующая обмотка по своему магнитному воздействию на цепи ротора эквивалентна двум взаимноперпендикулярным обмоткам d и q , вращающимся вместе с ротором. При этом, как видно из последней формулы, параметры обмоток d и q (активные и индуктивные сопротивления) совпадают с параметрами трехфазной обмотки, когда ее ось совпадает соответственно с продольной и поперечной осью ротора. Указанный выше способ преобразования токов с сохранением параметров фазы реальной обмотки (как будет видно дальше) значительно облегчает расчет селсинов и сравнение данных расчета с экспериментом.

§ 9. УРАВНЕНИЯ Э. Д. С. И МОМЕНТА СЕЛСИНА

Выше было показано, что электромагнитные явления в селсине наиболее удобно рассматриваются в осях d и q , связанных неподвижно с обмоткой возбуждения. Поэтому уравнения э. д. с. селсина получаются наиболее простыми для селсина, приведенного к двум фазам (рис. 42, б). Ниже будет показано, что уравнения э. д. с. этого селсина могут быть получены из уравнений э. д. с. реального трехфазного селсина (рис. 42, а)

путем преобразования токов, потокосцеплений и напряжений на основе формул преобразования (8.3).

При составлении уравнений э. д. с. примем обычные допущения для линейной теории электрических машин:

а) потери на гистерезис и вихревые токи в стали не учитываются;

б) учет насыщения стали производится путем выбора соответствующих значений параметров;

в) распределение м. д. с. и потокосцеплений по расточке статора принимается синусоидальным.

При дальнейшем изложении будем также считать, если это особо не оговорено, что время измеряется в так называемых синхронных секундах — $\frac{1}{2\pi f}$ сек. При этом $\omega = 2\pi f = 1$, н, следовательно, $x = \omega L = L$, т. е. индуктивные сопротивления обмоток численно равны соответствующим индуктивностям, что позволяет значительно сократить и упростить записи.

Обозначим:

r_f — активное сопротивление обмотки возбуждения;

x_f — её полное реактивное сопротивление (индуктивность), равное $x_f = x_{fd} + x_{fs}$;

r — активное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки;

x_d — полное реактивное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки при совпадении её оси с продольной осью ротора селсина ($x_d = x_{ad} + x_s$);

x_q — полное реактивное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки при совпадении её оси с поперечной осью ротора селсина ($x_q = x_{aq} + x_s$);

x_{af} — реактивное сопротивление взаимной индукции фазы синхронизирующей обмотки и обмотки возбуждения селсина при совпадении их осей;

x_{ak} — реактивное сопротивление взаимной индукции фазы синхронизирующей обмотки и демпферного контура селсина при совпадении их осей.

Расчетные формулы для указанных параметров, известные из теории синхронных машин, применительно к селсинам приводятся в главе VII.

Найдем потокосцепления контуров для двухфазного селсина, изображенного на рис. 42, б. Потокосцепление обмотки возбуждения состоит из двух частей: потокосцепления ($L i_f = x_f i_f$), обусловленного током i_f в самой обмотке, и потокосцепления взаимной индукции от тока i_d в эквивалентном продольном контуре селсина. Вторая составляющая потокосцепления равна $\frac{3}{2} L_{af} i_d = \frac{3}{2} x_{af} i_d$; при помощи множителя $\frac{3}{2}$ в этом выражении учитывается тот факт, что потокосцепление обмотки возбуждения должно составляться с учетом воздействия всех

трех фаз синхронизирующей обмотки. В результате для потокосцепления обмотки возбуждения получаем

$$\psi_f = x_f i_f + \frac{3}{2} x_{af} i_d;$$

аналогично составляются выражения потокосцеплений для остальных контуров селсина:

для демпферного контура

$$\psi_k = x_k i_k + \frac{3}{2} x_{ak} i_q;$$

для продольного контура

$$\psi_d = x_d i_d + x_{af} i_f;$$

для поперечного контура

$$\psi_q = x_q i_q + x_{ak} i_k,$$

где i_k и i_q , соответственно, токн в демпферном и поперечном эквивалентном контурах селсина.

Зная выражения для потокосцеплений, легко можно составить уравнения э. д. с. для всех контуров селсина. Для обмотки возбуждения это уравнение можно записать в форме:

$$r_f i_f = u_f + e_f = u_f - \frac{d\psi_f}{dt};$$

для демпферного контура

$$r_k i_k = e_k = - \frac{d\psi_k}{dt};$$

для продольного контура

$$r_d i_d = u_d + e_d = u_d - \frac{d\psi_d}{dt} - \dot{\gamma} \psi_q;$$

для поперечного контура

$$r_q i_q = u_q + e_q = u_q - \frac{d\psi_q}{dt} + \dot{\gamma} \psi_d,$$

где u_f , u_d , u_q — напряжения, приложенные к соответствующим контурам селсина: обмотке возбуждения, продольному d и поперечному q , эквивалентным контурам селсина;

e_f , e_k , e_d , e_q — э. д. с., индуцируемые в контурах селсина;

$\dot{\gamma}$ — угловая скорость вращения селсина.

Сделаем некоторые пояснения к приведенным выше уравнениям э. д. с. селсина.

В первых двух уравнениях e_f и e_k представляют собой э. д. с. самоиндукции, возникающие за счет изменения во времени результирующих потокосцеплений ψ_f и ψ_k обмоток возбуждения и демпферной.

Для выяснения физического смысла составляющих э.д.с. e_d и e_q в двух последних уравнениях представим контуры d и q селсина такими, какими они показаны на рис. 44, а. Контуры d и q , как уже указывалось, представляют собой некоторые эквивалентные продольные и поперечные обмотки селсина, заменяющие собой по электромагнитному воздействию на цепи ротора трехфазную синхронизирующую обмотку.

Данную замену надо понимать так: в каждый данный момент времени t вместо трехфазной обмотки статора вводятся две взаимноперпендикулярные обмотки d и q , создающие точно такую же м.д.с., что и трехфазная обмотка; обмотки

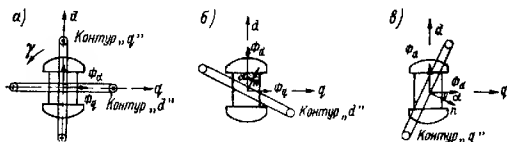


Рис. 44. Образование трансформаторной э.д.с. и э.д.с. вращения:
а — для контуров d и q ; б — для контура d ; в — для контура q .

d и q в течение бесконечно малого промежутка времени dt , которое необходимо для определения э.д.с. в этих обмотках, должны считаться неподвижными по отношению к статору и, следовательно, вращающимися по отношению к обмотке возбуждения.

Пусть α — бесконечно малый угол, на который (за время, пока мы определяли э.д.с.) повернулся контур d относительно оси обмотки возбуждения, тогда э.д.с. e_d в контуре d будет равна (рис. 44, б):

$$\begin{aligned} e_d &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[-\frac{d}{dt} (\psi_d \cos \alpha + \psi_q \sin \alpha) \right] = \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[-\frac{d\psi_d}{dt} \cos \alpha + \psi_d \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt} - \frac{d\psi_q}{dt} \sin \alpha + \psi_q \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt} \right] = \\ &= -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \frac{d\alpha}{dt} = -\frac{d\psi_d}{dt} - \dot{\gamma} \psi_q, \end{aligned}$$

так как

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma}.$$

Отсюда следует, что э.д.с. e_d в контуре d состоит из двух частей:

- $-\frac{d\psi_d}{dt}$ — трансформаторной э.д.с., обусловленной изменением магнитного потока Φ_d во времени;
- $-\dot{\gamma} \psi_q$ — э.д.с. вращения, зависящей от скорости вращения ротора селсина.

Точно также для э. д. с. e_q в контуре q (рис. 44, *в*) получаем:

$$\begin{aligned} e_q &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \left[-\frac{d}{dt} (\psi_q \cos \alpha - \psi_d \sin \alpha) \right] = \\ &= \lim_{\alpha \rightarrow 0} \left(-\frac{d\psi_q}{dt} \cos \alpha + \psi_q \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt} + \frac{d\psi_d}{dt} \sin \alpha + \psi_d \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt} \right) = \\ &= -\frac{d\psi_q}{dt} + \dot{\psi}_d \frac{d\alpha}{dt} = -\frac{d\psi_q}{dt} + \dot{\psi}_d, \end{aligned}$$

где

$-\frac{d\psi_q}{dt}$ — трансформаторная э. д. с., обусловленная изменением потока Φ_q во времени;

$\dot{\psi}_d$ — э. д. с. вращения, зависящая от скорости вращения ротора.

Выражения для э. д. с. e_d и e_q могут быть также получены путем непосредственного применения закона электромагнитной индукции в форме Максвелла—Лоренца для движущихся проводников, согласно которому э. д. с. в контуре состоит из трансформаторной э. д. с. от изменения магнитного поля во времени и э. д. с. вращения от пересечения магнитного поля сторонами контура.

Применяя этот закон к контурам d и q (см. рис. 44, *а*), получим:

$$\begin{aligned} e_d &= e_r + e_{вр} = -\frac{d\psi_d}{dt} - \dot{\psi}_q; \\ e_q &= e_r + e_{вр} = -\frac{d\psi_q}{dt} + \dot{\psi}_d. \end{aligned}$$

Знаки э. д. с. вращения в данном случае могут быть определены по правилу правой руки, причем э. д. с. считается положительной (отрицательной), если вызываемый ею ток в контуре создает м. д. с., направленную по положительному (отрицательному) направлению осей d и q .

На рис. 44, *а* показаны направления э. д. с. вращения в витках контуров d и q при вращении ротора селсина против часовой стрелки. Из рисунка видно, что э. д. с. вращения в контуре q положительна, а в контуре d отрицательна, ибо э. д. с. вращения в контуре q создает ток и м. д. с. в положительном направлении оси q , а в контуре d — в отрицательном направлении оси d . Поскольку трехфазная обмотка статора симметрична по отношению к угловому положению ротора, то эквивалентные ей обмотки d и q оказываются одинаковыми для всех положений ротора и при любых моментах времени, что и лежит в основе возможности перехода от схемы реального селсина 42, *а* к схеме эквивалентного двухфазного селсина 42, *б*.

Введя обозначение $p = \frac{d}{dt}$ — оператор дифференцирования, уравнения э. д. с. селсина запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= r_f i_f + p\psi_f \\ u_d &= r_d i_d + p\psi_d + p\gamma\psi_q \\ u_q &= r_q i_q + p\psi_q - p\gamma\psi_d \\ 0 &= r_k i_k + p\psi_k \end{aligned} \right\}. \quad (9.1)$$

Уравнения э. д. с. (9.1) в координатах d и q могут быть непосредственно получены из уравнения э. д. с. реальных контуров селсина путем преобразования токов, потокосцеплений и напряжений по формулам (8.3) и (8.4). Для контуров реальных обмоток селсина (рис. 45) имеем уравнения э. д. с.:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= r_f i_f + p\psi_f \\ 0 &= r_k i_k + p\psi_k \\ u_A &= r_A i_A + p\psi_A \\ u_B &= r_B i_B + p\psi_B \\ u_C &= r_C i_C + p\psi_C \end{aligned} \right\}. \quad (9.2)$$

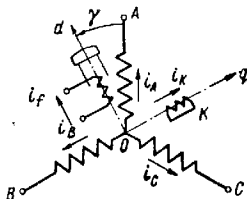


Рис. 45. Положительные направления токов в обмотках селсина.

В этих выражениях через $i_A, i_B, i_C; \psi_A, \psi_B, \psi_C; u_A, u_B$ и u_C обозначены токи, потокосцепления и фазные значения напряжений синхронизирующей обмотки.

Первые два уравнения (9.2) для контуров возбуждения и демпферного совпадают с соответствующими уравнениями (9.1). Преобразуем последние три уравнения (9.2).

Умножая уравнения почленно, соответственно, один раз на $\frac{2}{3} \cos \gamma, \frac{2}{3} \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right), \frac{2}{3} \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right)$ и складывая, а затем на $\frac{2}{3} \sin \gamma, \frac{2}{3} \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right), \frac{2}{3} \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right)$ и также складывая, получим два уравнения

$$\left. \begin{aligned} u_d &= r_d i_d + p\psi_d + p\gamma\psi_q \\ u_q &= r_q i_q + p\psi_q - p\gamma\psi_d \end{aligned} \right\}. \quad (9.3)$$

Величины $u_d, u_q; i_d, i_q; \psi_d$ и ψ_q определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_d &= A_A \cos \gamma + A_B \cos \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + A_C \cos \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \\ A_q &= A_A \sin \gamma + A_B \sin \left(\gamma - \frac{2}{3} \pi \right) + A_C \sin \left(\gamma + \frac{2}{3} \pi \right) \end{aligned} \right\}, \quad (9.4)$$

где под A понимается любая из величин u, i и ψ .

При преобразовании уравнений (9.2) к (9.3) используем тождества типа

$$p\psi_A \cos \gamma = p(\psi_A \cos \gamma) + p\gamma\psi_A \sin \gamma;$$

$$p\psi_A \sin \gamma = p(\psi_A \sin \gamma) - p\gamma\psi_A \cos \gamma \text{ и т. д.}$$

Уравнения (9.3) совпадают по виду со 2 и 3 уравнениями (9.1). Для того чтобы показать, что полученные уравнения полностью соответствуют уравнениям (9.1), необходимо доказать, что выражения для потокосцеплений ψ_f , ψ_k , ψ_d и ψ_q совпадают с введенными ранее.

Потокосцепления обмотки возбуждения и демпферной обмотки вычисляются весьма просто (рис. 45):

$$\psi_f = x_{ff} i_f + x_{af} [i_A \cos \gamma + i_B \cos (\gamma - \frac{2}{3} \pi) + i_C \cos (\gamma + \frac{2}{3} \pi)] = x_{ff} i_f + \frac{3}{2} x_{af} i_d; \quad (9.5)$$

$$\psi_k = x_{kk} i_k + x_{ak} [i_A \sin \gamma + i_B \sin (\gamma - \frac{2}{3} \pi) + i_C \sin (\gamma + \frac{2}{3} \pi)] = x_{kk} i_k + \frac{3}{2} x_{ak} i_q, \quad (9.6)$$

что полностью совпадает с полученными ранее выражениями.

Несколько сложнее вычисление потокосцеплений ψ_d и ψ_q . Прежде всего найдем потокосцепление фазы синхронизирующей обмотки. Для фазы A имеем:

$$\begin{aligned} \psi_A = & x_{as} i_A - x_{ms} (i_B + i_C) + x_{af} i_f \cos \gamma + x_{ak} i_k \sin \gamma + \\ & + \frac{2}{3} x_{ad} [i_A \cos \gamma + i_B \cos (\gamma - \frac{2}{3} \pi) + i_C \cos (\gamma + \frac{2}{3} \pi)] \cos \gamma + \\ & + \frac{2}{3} x_{aq} [i_A \sin \gamma + i_B \sin (\gamma - \frac{2}{3} \pi) + i_C \sin (\gamma + \frac{2}{3} \pi)] \sin \gamma, \end{aligned} \quad (9.7)$$

где

$$\begin{aligned} x_{as} i_A & \text{— потокосцепление от собственных} \\ & \text{токов рассеяния фазы } A; \\ -x_{ms} (i_B + i_C) & = x_{ms} i_A \text{— потокосцепление рассеяния вза-} \\ & \text{имной индукции фаз } B \text{ и } C; \\ x_{af} i_f \cos \gamma & \text{— потокосцепление взаимной индук-} \\ & \text{ции, создаваемое обмоткой воз-} \\ & \text{буждения;} \\ x_{ak} i_k \sin \gamma & \text{— потокосцепление взаимной индук-} \\ & \text{ции, создаваемое демпферной} \\ & \text{обмоткой.} \end{aligned}$$

Последние два слагаемых в ψ_A представляют собой потоко-сцепления взаимо- и самоиндукции через воздушный зазор, создаваемые токами в фазах трехфазной обмотки. Множи-тель $\frac{2}{3}$ в формуле (9.7) объясняется тем, что под x_{ad} и x_{aq} понимаются параметры, обусловленные результирующим маг-нитным потоком трехфазной обмотки, который в полтора раза больше потока, создаваемого одной фазой (подробно об этом см. М. П. Костенко, „Электрические машины“, специ-альная часть, стр. 329—331).

Аналогично можно получить выражение для потоко-сцеп-лений ψ_B и ψ_C с заменой γ на $(\gamma - \frac{2}{3}\pi)$ и $(\gamma + \frac{2}{3}\pi)$.

Подставляя полученные выражения в формулы (9.4) для ψ_d и ψ_q и имея в виду соотношения:

$$\begin{aligned} i_A + i_B + i_C &= 0; \\ \cos^2 \gamma + \cos^2 \left(\gamma - \frac{2}{3}\pi \right) + \cos^2 \left(\gamma + \frac{2}{3}\pi \right) &= \frac{3}{2}; \\ \sin^2 \gamma + \sin^2 \left(\gamma - \frac{2}{3}\pi \right) + \sin^2 \left(\gamma + \frac{2}{3}\pi \right) &= \frac{3}{2}; \\ \cos \gamma \sin \gamma + \cos \left(\gamma - \frac{2}{3}\pi \right) \sin \left(\gamma - \frac{2}{3}\pi \right) + \\ + \cos \left(\gamma + \frac{2}{3}\pi \right) \sin \left(\gamma + \frac{2}{3}\pi \right) &= 0, \end{aligned}$$

получим приведенные выше формулы для потоко-сцеплений

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_d &= x_{af} i_f + x_d i_d; \\ \dot{\psi}_q &= x_{ak} i_k + x_q i_q \end{aligned} \right\}. \quad (9.8)$$

Простота полученных выражений для потоко-сцеплений по сравнению с потоко-сцеплениями реальных обмоток [фор-мула (9.7)] указывает на большие преимущества выбора ко-ординат d и q при анализе селсинов.

Подставляя выражения для потоко-сцеплений (9.5), (9.6) и (9.8) в уравнения (9.1), последние запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} u_f &= (r_f + p x_f) i_f + \frac{3}{2} x_{af} p i_d \\ 0 &= (r_k + p x_k) i_k + \frac{3}{2} x_{ak} p i_q \\ u_d &= x_{af} p i_f + (r + x_d p) i_d + p \gamma x_{ak} i_k + p \gamma x_q i_q \\ u_q &= x_{ak} p i_k + (r + x_q p) i_q - p \gamma x_{af} i_f - p \gamma x_d i_d \end{aligned} \right\}. \quad (9.9)$$

Полученные уравнения справедливы как для переходных, так и для установившихся режимов работы селсина. В уста-новившемся режиме, который исследуется в настоящей главе, ток и напряжения являются синусоидальными функциями

времени. В этом случае их можно представить в виде комплексных векторов $\dot{I}_d, \dot{I}_f, \dot{U}_d, \dot{U}_q, \dot{U}_f$ и т. д., а в уравнениях (9.9) заменить $p=j$ (так как $\omega=1$) и $p\gamma=v$, где v — угловая скорость вращения ротора в долях от синхронной скорости ($v = \frac{\omega p}{\omega_c}$).

Поэтому уравнения э. д. с. установившегося режима можно записать в виде:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_f &= (r_f + jx_f) \dot{I}_f + j \frac{3}{2} x_{af} \dot{I}_d \\ 0 &= (r_k + jx_k) \dot{I}_k + j \frac{3}{2} x_{ak} \dot{I}_q \\ \dot{U}_d &= jx_{af} \dot{I}_f + (r + jx_d) \dot{I}_d + vx_{ak} \dot{I}_k + vx_q \dot{I}_q \\ \dot{U}_q &= jx_{ak} \dot{I}_k + (r + jx_q) \dot{I}_q - vx_{af} \dot{I}_f - vx_d \dot{I}_d \end{aligned} \right\} \quad (9.10)$$

Преобразуем уравнения (9.9) и, соответственно (9.10), исключив из них токи $\dot{I}_f$ и $\dot{I}_k$. Для этого надо выразить их через токи $\dot{I}_d$ и $\dot{I}_q$ и напряжение u_f из первых двух уравнений и подставить в два последних.

Выполняя это применительно к уравнениям (9.9), получим

$$\left. \begin{aligned} [r + px_d(p)] \dot{I}_d + p\gamma x_q(p) \dot{I}_q &= u_d - pG(p) u_f \\ -p\gamma x_d(p) \dot{I}_d + [r + px_q(p)] \dot{I}_q &= u_q + p\gamma G(p) u_f \end{aligned} \right\}, \quad (9.11)$$

где

$$\left. \begin{aligned} x_d(p) &= x_d - \frac{3}{2} \frac{x_{af}^2 p}{r_f + x_f p} \\ x_q(p) &= x_q - \frac{3}{2} \frac{x_{ak}^2 p}{r_k + x_k p} \\ G(p) &= \frac{x_{af}}{r_f + x_f p} \end{aligned} \right\}, \quad (9.12)$$

Аналогично для уравнений (9.10) имеем:

$$\left. \begin{aligned} [r + jx_d(j)] \dot{I}_d + vx_q(j) \dot{I}_q &= \dot{U}_d - jG(j) \dot{U}_f \\ -vx_d(j) \dot{I}_d + [r + jx_q(j)] \dot{I}_q &= \dot{U}_q + vG(j) \dot{U}_f \end{aligned} \right\}, \quad (9.11')$$

где

$$\left. \begin{aligned} x_d(j) &= x_d - \frac{3}{2} \frac{jx_{af}^2}{r_f + jx_f} = x_d' - jz_f r_f \\ x_q(j) &= x_q - \frac{3}{2} \frac{jx_{ak}^2}{r_k + jx_k} = x_q' - jz_k r_k \\ G(j) &= \frac{x_{af}}{r_f + jx_f} \end{aligned} \right\}. \quad (9.12')$$

$$x_d' = x_d - \tau_f x_f; \quad \tau_f = \frac{3}{2} \frac{x_{af}^2}{r_f^2 + x_f^2} = \frac{3}{2} \frac{x_{af}^2}{z_f^2};$$

$$x_q' = x_q - \tau_k x_k; \quad \tau_k = \frac{3}{2} \frac{x_{ak}^2}{r_k^2 + x_k^2} = \frac{3}{2} \frac{x_{ak}^2}{z_k^2}.$$

Заметим, что уравнения (9.11') могут быть получены из уравнений (9.11) путем замены p на равное ей j и $p\tau$ на v .

Уравнения (9.11) и (9.11') показывают, что вид уравнений для контуров d и q , после исключения токов i_f и i_k , не изменился; только вместо обычных реактивных сопротивлений x_d и x_q появились так называемые операторные сопротивления $x_d(p)$ и $x_q(p)$, определяемые формулами (9.12).

Укажем на физический смысл добавочных членов, появившихся в правой части уравнения (9.11'), где

$-jG(j)\dot{U}_f = \frac{\dot{U}_f}{r_f + jx_f}(-jx_{af}) = \dot{E}_\phi$ — представляет собой максимальное значение фазной э. д. с. синхронизирующей обмотки. Очевидно, $\dot{E}_\phi = \frac{\dot{E}_n}{\sqrt{3}}$, где $\dot{E}_n$ — линейное значение э. д. с. синхронизирующей обмотки;

$vG(j)\dot{U}_f - jv\dot{E}_\phi$ — э. д. с. вращения в контуре q от потока обмотки возбуждения, обусловленная вращением ротора селсина; она опережает трансформаторную э. д. с. по фазе на 90° .

Учитывая введенные обозначения, уравнения (9.11') запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} [r + jx_d(j)]\dot{I}_d + vx_q(j)\dot{I}_q &= \dot{U}_d + \dot{E}_\phi \\ -vx_d(j)\dot{I}_d + [r + jx_q(j)]\dot{I}_q &= \dot{U}_q + jv\dot{E}_\phi \end{aligned} \right\}. \quad (9.13)$$

В отличие от уравнений (9.10), составленных для двухфазного селсина (рис. 42, б), уравнения (9.13) содержат только два тока $\dot{I}_d$ и $\dot{I}_q$ уже в некоторых новых двух контурах d и q . Новые контуры по сравнению с контурами d и q , изображенными на рис. 42, б, имеют другие значения параметров, определяемые формулами (9.12'). Кроме того, последовательно с каждым из контуров включены источники э. д. с.: $\dot{E}_\phi$ — для контура d и $jv\dot{E}_\phi$ — для контура q . Все это позволяет схему двухфазного селсина с исключенными обмотками возбуждения и демпферной изобразить в виде селсина, содержащего всего только две обмотки d и q (рис. 46) с параметрами $z_d(j) = r + jx_d(j)$ и $z_q(j) = r + jx_q(j)$. При составлении уравнений э. д. с. такого селсина, кроме падений напряжений $\dot{z}_d(j)\dot{I}_d$ и $\dot{z}_q(j)\dot{I}_q$ в обмотках селсина, должны быть учтены э. д. с.

вращения от собственных потоков сцепления $x_d(j)\dot{I}_d$ и $x_q(j)\dot{I}_q$ подобно тому, как это было сделано выше для двухфазного селсина (см. рис. 42, б). В уравнениях (9.13) они представлены в виде членов $v x_q(j)\dot{I}_q$ и $-v x_d(j)\dot{I}_d$.

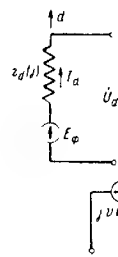


Рис. 46. Схема селсина, приведенного к двум контурам.

Из сказанного выше следует, что введение двухобмоточного селсина не изменяет общих принципов при составлении уравнений э. д. с. и оказывается весьма удобным при теоретическом исследовании систем синхронной связи.

Уравнения э. д. с. селсина для новых контуров d и q могут быть записаны также в виде уравнений (9.3) через потокосцепления

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_d &= r\dot{I}_d + j\dot{\psi}_d + v\dot{\psi}_q \\ \dot{U}_q &= r\dot{I}_q + j\dot{\psi}_q - v\dot{\psi}_d \end{aligned} \right\}. \quad (9.14)$$

Формулы для потокосцеплений $\dot{\psi}_d$ и $\dot{\psi}_q$ получаются из формул (9.8) путем замены в них токов $\dot{I}_f$, $\dot{I}_k$ выражениями через $\dot{I}_d$ и $\dot{I}_q$ из формул (9.10):

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_d &= G(j)\dot{U}_f + x_d(j)\dot{I}_d = j\dot{E}_\phi + x_d(j)\dot{I}_d \\ \dot{\psi}_q &= x_q(j)\dot{I}_q \end{aligned} \right\}. \quad (9.15)$$

Уравнения (9.14) можно рассматривать как результат проектирования на оси d и q некоторого векторного уравнения, связывающего пространственные векторы $\vec{U}$, $\vec{I}$, $\vec{\psi}$ и $\vec{B}$:

$$\vec{U} = r\vec{I} + j\vec{\psi} + v\vec{B}. \quad (9.14')$$

Введенные пространственные векторы должны соответственно иметь составляющие $\dot{U}_d$, $\dot{U}_q$; $\dot{I}_d$, $\dot{I}_q$; $\dot{\psi}_d$, $\dot{\psi}_q$; $\dot{\psi}_q$, $-\dot{\psi}_d$, представляющие собой комплексные временные векторы.

Выразим теперь электромагнитный момент на валу селсина. В главе I было показано, что момент на валу селсина, обусловленный взаимодействием продольного и поперечного токов и потоков, может быть вычислен по формуле

$$M = K'(\dot{\psi}_d \dot{I}_q - \dot{\psi}_q \dot{I}_d).$$

Эта формула дает мгновенное значение момента. В том случае, когда токи и потокосцепления изменяются по синусу

социальному закону во времени, среднее значение момента будет равно:

$$M = \frac{3}{2} [\psi_d \dot{I}_q \cos(\psi_d \dot{I}_q) - \psi_q \dot{I}_d \cos(\psi_q \dot{I}_d)],$$

где $\psi_d, \psi_q; I_d, I_q$ — эффективные значения потокосцеплений и токов. Момент выражается в синхронных ваттах.

Из теории переменных токов известно, что

$$\dot{\psi}_d \dot{I}_q \cos(\psi_d \dot{I}_q) = \operatorname{Re}(\dot{\psi}_d \dot{I}_q^*);$$

$$\dot{\psi}_q \dot{I}_d \cos(\psi_q \dot{I}_d) = \operatorname{Re}(\dot{\psi}_q \dot{I}_d^*),$$

где Re — означает реальную часть комплексного числа;

(*) — комплексно-сопряженное значение.

Соответственно, выражение для момента запишем в виде

$$M = \frac{3}{2} \operatorname{Re}(\dot{\psi}_d \dot{I}_q^* - \dot{\psi}_q \dot{I}_d^*).$$

При принятом нами способе расположения обмоток (синхронизирующая обмотка на статоре) данная формула дает момент, приложенный к статору селсина. Момент же, приложенный к ротору, очевидно будет определяться таким же выражением с обратным знаком:

$$M = -\frac{3}{2} \operatorname{Re}(\dot{\psi}_d \dot{I}_q^* - \dot{\psi}_q \dot{I}_d^*). \quad (9.16)$$

Подставляя сюда выражения для $\dot{\psi}_d$ и $\dot{\psi}_q$, будем иметь:

$$M = -\frac{3}{2} \operatorname{Re}(x_{af} \dot{I}_f \dot{I}_q^* + x_{ad} \dot{I}_d \dot{I}_q^* - x_{ak} \dot{I}_k \dot{I}_d^* - x_{aq} \dot{I}_q \dot{I}_d^*). \quad (9.17)$$

Последнее выражение можно дополнительно преобразовать, выразив, как это было сделано при выводе уравнений (9.13), $\dot{I}_f$ и $\dot{I}_k$ через $\dot{I}_d$ и $\dot{I}_q$. В результате получим

$$M = -\frac{3}{2} \operatorname{Re}[x_d(j) \dot{I}_d \dot{I}_q^* - x_q(j) \dot{I}_q \dot{I}_d^* + G(j) \dot{U}_f \dot{I}_q^*] \quad (9.18)$$

или, пользуясь тем, что

$$G(j) \dot{U}_f = j \dot{E}_\Phi \text{ и } \operatorname{Re}[x_q(j) \dot{I}_q \dot{I}_d^*] = \operatorname{Re}[x_q(-j) \dot{I}_q^* \dot{I}_d],$$

формулу (9.18) запишем в виде

$$M = -\frac{3}{2} \operatorname{Re}\{[x_d(j) - x_q(-j)] \dot{I}_d \dot{I}_q^* + j \dot{E}_\Phi \dot{I}_q^*\}. \quad (9.18')$$

Во всех вышеприведенных формулах момент выражается

в так называемых синхронных ваттах. В селсинах же обычно синхронизирующий момент выражают в $гдм$ или $гсм$.

Для перехода от синхронных ватт к $гдм$ служит множитель $\frac{1,02 \cdot 10^3}{\omega}$, где ω — угловая частота сети.

§ 10. ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ СЕЛСИНА

Уравнения для э.д.с. селсина, выведенные в предыдущем параграфе, могут быть преобразованы таким образом, чтобы они представляли собой уравнения 2-го закона Кирхгофа для некоторой электрической цепи. Такого рода электрическая цепь называется эквивалентной схемой. Эквивалентные схемы позволяют получить наглядное представление о процессах, протекающих в селсине, и очень полезны при расчете его параметров.

Рассмотрим эквивалентные схемы неподвижного селсина, у которого $\psi = 0$. В этом случае э.д.с. вращения отсутствует и уравнения э.д.с. для продольного и поперечного контуров селсина оказываются независимыми.

Имеем для продольной оси селсина:

$$\begin{cases} \dot{U}_f = (r_f + jx_f) \dot{I}_f + j \frac{3}{2} x_{af} \dot{I}_d \\ \dot{U}_d = jx_{af} \dot{I}_f + (r + jx_d) \dot{I}_d \end{cases} \quad (10.1)$$

Эти два уравнения легко могут быть преобразованы к уравнениям двухобмоточного трансформатора, эквивалентная схема которого хорошо известна. Для этого приведем ток и напряжение обмотки возбуждения к фазе синхронизирующей обмотки по формулам:

$$\dot{I}'_f = \dot{I}_f \frac{x_{af}}{x_{ad}}; \quad \dot{U}'_f = \dot{U}_f \frac{2x_{ad}}{3x_{af}}. \quad (10.2)$$

При этом уравнения (10.1) запишутся в виде.

$$\begin{cases} \dot{U}_d = (r + jx_d) \dot{I}_d + jx_{ad} \dot{I}'_f \\ \dot{U}_f = jx_{ad} \dot{I}_d + (r'_f + jx'_f) \dot{I}'_f \end{cases}$$

или, вводя приведенные параметры обмотки возбуждения, определяемые по формулам:

$$\begin{cases} r'_f = \frac{2}{3} \left(\frac{x_{ad}}{x_{af}} \right)^2 r_f \\ x'_{fs} = \frac{2}{3} \left(\frac{x_{ad}}{x_{af}} \right)^2 x_{fs} + x_{ad} \left(\frac{2}{3} \frac{x_{ad} x_{fd}}{x_{af}^2} - 1 \right) \end{cases} \quad (10.3)$$

где

$$x_{fd} = x_f - x_{fs}; \quad x_{ad} = x_d - x_s.$$

а x_{fs} и x_s — индуктивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения и фазы трехфазной обмотки,

получим

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_d &= (r + jx_s) \dot{I}_d + jx_{ad} \dot{I}_d + jx_{ad} \dot{I}'_f \\ \dot{U}'_f &= jx_{ad} \dot{I}_d + jx_{ad} \dot{I}'_f + (r'_f + jx'_{fs}) \dot{I}'_f \end{aligned} \right\}. \quad (10.4)$$

Теперь уже нетрудно установить, что уравнениям (10.4) соответствует эквивалентная схема, изображенная на рис. 47,

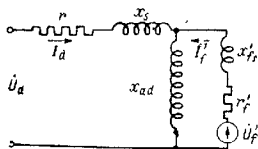


Рис. 47. Эквивалентная схема сел-сина по продольной оси.

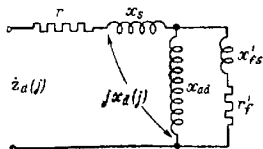


Рис. 48. Эквивалентная схема для определения сопротивления сел-сина по продольной оси.

Полученная эквивалентная схема может быть использована при расчете переходных параметров в продольной оси (рис. 48):

$$z_d(j) = r + jx_d(j) = r'_d + jx'_d, \quad (10.5)$$

где по формулам (9.12')

$$\left. \begin{aligned} r'_d &= r + \tau_f r'_f \\ x'_d &= x_d - \tau_f x'_f \end{aligned} \right\}. \quad (10.6)$$

Точно также устанавливается эквивалентная схема для поперечной оси. Имеем уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_q &= (r + jx_q) \dot{I}_q + jx_{ak} \dot{I}_k \\ 0 &= j\frac{3}{2} x_{ak} \dot{I}_q + (r_k + jx_k) \dot{I}_k \end{aligned} \right\}. \quad (10.7)$$

Приводим ток демпферной обмотки к фазе синхронизирующей обмотки:

$$\dot{I}'_k = \dot{I}_k \frac{x_{ak}}{x_{aq}}.$$

Вводя приведенные параметры демпферного контура по формулам

$$\left. \begin{aligned} r'_k &= \frac{2}{3} \left(\frac{x_{aq}}{x_{ak}} \right)^2 r_k \\ x'_{ks} &= \frac{2}{3} \left(\frac{x_{aq}}{x_{ak}} \right)^2 x_{ks} + x_{aq} \left(\frac{2}{3} \frac{x_{aq} x_{kq}}{x_{ak}^2} - 1 \right) \end{aligned} \right\}, \quad (10.8)$$

где

$$x_{kq} = x_k - x_{ks}; \quad x_{aq} = x_q - x_s,$$

уравнения (10.7) запишем в виде:

$$\begin{aligned} \dot{U}_q &= (r + jx_s) \dot{I}_q + jx_{aq} \dot{I}_q + jx_{aq} \dot{I}'_k; \\ 0 &= jx_{aq} \dot{I}_q + jx_{aq} \dot{I}'_k + (r'_k + jx'_k) \dot{I}'_k. \end{aligned} \quad (10.9)$$

Уравнениям (10.9) соответствует эквивалентная схема, приведенная на рис. 49, а.

На основе полученной эквивалентной схемы обычно рассчитываются переходные параметры селсина в поперечной оси (рис. 49, б)

$$z_q(j) = r + jx_q(j) = r'_a + jx'_q, \quad (10.10)$$

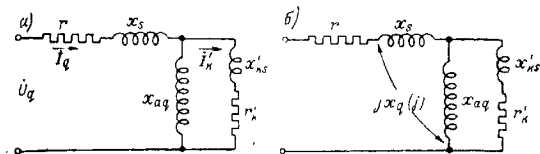


Рис. 49. а — Эквивалентная схема селсина по поперечной оси; б — эквивалентная схема для расчета параметров r'_q и x'_q по поперечной оси.

где по формулам (9.12')

$$\left. \begin{aligned} r'_q &= r + \tau_k r_k \\ x'_q &= x_q - \tau_k x_k \end{aligned} \right\}. \quad (10.11)$$

В полученных эквивалентных схемах селсина в продольной и поперечной осях не учитывались потери в стали.

В тех случаях, когда потери в стали имеют существенное значение (например, при повышенных частотах), они учитываются введением активного сопротивления r_m параллельно индуктивности намагничивания (рис. 50).

Величина этого сопротивления, например для продольной оси, находится из соотношения

$$r_m = \frac{E_{ad}}{I_a} = \frac{E_{ad}^2}{P_{Fe}}.$$

В силу малости активной составляющей тока I_a по сравнению с током намагничивания можем принять (рис. 51)

$$r_m = \frac{E_{ad}}{I_0 \sin \varepsilon} = \frac{E_{ad}}{I_\mu \sin \varepsilon} = \frac{x_{ad}}{\sin \varepsilon} \approx \frac{x_{ad}}{\varepsilon},$$

где ε — можно считать величиной малой ($\varepsilon \ll 1$).

Значение ε определяется по потерям в стали:

$$\varepsilon \approx \sin \varepsilon = \frac{P_{Fe}}{I_0 E_{ad}}.$$

Найдем величину z_d (при разомкнутой цепи возбуждения):

$$z_d = r + jx_s + \frac{r_m jx_{ad}}{r_m + jx_{ad}} = r + jx_s + \frac{jx_{ad}}{1 + j\varepsilon}$$

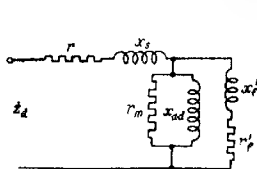


Рис. 50. Сопротивление селсина по продольной оси с учетом потерь в стали.

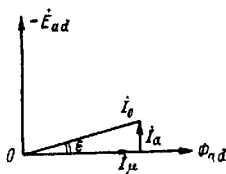


Рис. 51. Векторная диаграмма токов по продольной оси.

или, пренебрегая членами с ε^2 ,

$$z_d = r + \varepsilon x_{ad} + j(x_{ad} + x_s) = r + \varepsilon x_{ad} + jx_d, \quad (10.12)$$

что означает, что учет потерь в стали приводит к увеличению активного сопротивления на величину εx_{ad} .

Определим переходное сопротивление $z_d(j)$:

$$z_d(j) = r + jx_s + \frac{jx_{ad}(r'_f + jx'_{fs})}{(1 + j\varepsilon)(r'_f + jx'_{fs}) + jx_{ad}}.$$

Производя элементарные алгебраические преобразования, получим

$$z_d(j) = (r + \varepsilon x_{ad}) + j(x_{ad} + x_s) + \frac{x_{ad}^2(1 - j\varepsilon)}{(r'_f - \varepsilon x'_{fs}) + j(x'_f + \varepsilon r'_f)}.$$

Отделяя вещественную и мнимую части и производя некоторые упрощения, будем иметь:

$$\left. \begin{aligned} r'_d &= r + \varepsilon x_{ad} + \frac{x_{ad}^2(r'_f - \varepsilon x_{ad} - 2\varepsilon x'_{fs})}{(r'_f - \varepsilon x'_{fs})^2 + (x'_f + \varepsilon r'_f)^2} \\ x'_d &= x_d - \frac{x_{ad}^2(x'_f + 2\varepsilon r'_f)}{(r'_f - \varepsilon x'_{fs})^2 + (x'_f + \varepsilon r'_f)^2} \end{aligned} \right\}. \quad (10.13)$$

Из первой формулы следует, что если $\varepsilon(x_{ad} + 2x'_{fs}) > r'_f$, то замыкание обмотки возбуждения должно привести к уменьшению активного сопротивления эквивалентного контура в продольной оси.

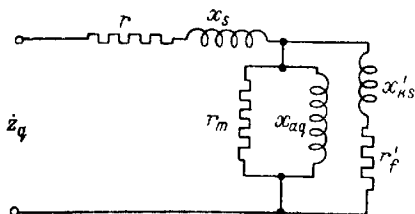


Рис. 52. Сопротивление селсина по поперечной оси с учетом потерь в стали.

Аналогичные формулы могут быть получены и для параметров эквивалентной цепи селсина в поперечной оси (рис. 52):

$$\left. \begin{aligned} r'_q &= r + \varepsilon x_{aq} + \frac{x_{aq}^2 (r'_k - \varepsilon x_{aq} - 2\varepsilon x'_{ks})}{(r'_k - \varepsilon x'_{ks})^2 + (x'_k + \varepsilon r'_k)^2} \\ x'_q &= x_q - \frac{x_{aq}^2 (x'_k + 2\varepsilon r'_k)}{(r'_k - \varepsilon x'_{ks})^2 + (x'_k + \varepsilon r'_k)^2} \end{aligned} \right\} \quad (10.14)$$

Заметим, что в формулах (10.13) и (10.14) параметры обмоток возбуждения и демпферной представляют собой приведенные к фазе синхронизирующей обмотки значения.

§ 11. УРАВНЕНИЯ Э. Д. С. И МОМЕНТОВ СЕЛСИНА В ОСЯХ d_1 и q_2 , ПОВЕРНУТЫХ НА НЕКОТОРЫЙ УГОЛ ψ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОСЯМ d и q

Уравнения э. д. с. селсина, рассмотренные в § 9, составлены для некоторых фиктивных продольного d и поперечного q контуров селсина, занимающих вполне определенное положение по отношению к цепи возбуждения селсина. Эти продольный и поперечный контуры селсина заменяют собой его синхронизирующую обмотку.

В системах синхронной связи датчик и приемник соединяются между собой своими трехфазными синхронизирующими обмотками. При преобразовании токов в каждом из селсинов (датчике и приемнике) к осям d и q , т. е. к некоторым фиктивным продольному и поперечному контурам, это соединение должно осуществляться между фиктивными контурами.

Очевидно, что в согласованном положении уравнительные токи в синхронизирующей обмотке отсутствуют. Схема сое-

динений в осях d и q для этого случая представлена на рис. 53.

Эту схему следует понимать следующим образом: для любого произвольного, но согласованного положения селсинов — датчика и приемника трехфазные синхронизирующие обмотки заменяются эквивалентными двухфазными обмотками, совпадающими в каждый момент времени с продольной и поперечной осями селсинов.

Введение угла рассогласования в систему синхронной связи означает, что роторы датчика и приемника повернуты на

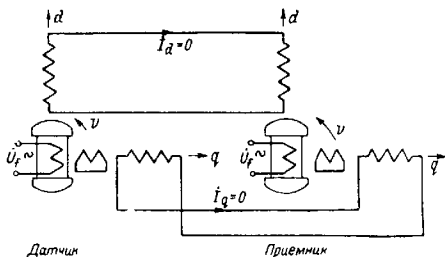


Рис. 53. Схема синхронной передачи, приведенная к осям d и q в согласованном положении.

различные углы по отношению к фазам синхронизирующей обмотки и между ними имеется угол рассогласования θ .

На такой же угол рассогласования θ должны быть повернуты роторы датчика и приемника по отношению к фиктивным контурам d и q , заменяющим трехфазную синхронизирующую обмотку.

Совершенно очевидно, что потокоцепления и сопротивления фиктивных контуров d_1 и q_1 , повернутых на некоторый угол δ по отношению к осям d и q селсина, будут иметь другие значения. Поэтому важно получить выражения потокоцеплений и уравнения э.д.с. и моментов для этих контуров, повернутых на угол δ .

Это сравнительно легко сделать, поскольку токи (м.д.с.) и потокоцепления распределены по расточке статора по синусоидальному закону, и задача сводится к проектированию векторного уравнения (9.14) на новые оси d_1 и q_1 . Схема селсина с контурами d_1 и q_1 , повернутыми на некоторый угол δ по отношению к продольной и поперечной осям d и q , изображена на рис. 54.

Нетрудно видеть, что уравнения э.д.с. в осях d_1 и q_1

должны быть вида (9.14), только под $\dot{\psi}_{d_1}$ и $\dot{\psi}_{q_1}$ здесь следует понимать проекции вектора потокосцепления $\vec{\psi}$ на новые оси (рис. 55):

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{d_1} &= r i_{d_1} + j \dot{\psi}_{d_1} + v \dot{\psi}_{q_1} \\ \dot{U}_{q_1} &= r i_{q_1} + j \dot{\psi}_{q_1} - v \dot{\psi}_{d_1} \end{aligned} \right\} \quad (11.1)$$

Выражая потокосцепления $\dot{\psi}_{d_1}$, $\dot{\psi}_{q_1}$ через токи i_{d_1} и i_{q_1} , имеем

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_{d_1} &= \dot{\psi}_d \cos \delta + \dot{\psi}_q \sin \delta; \quad i_q = i_{d_1} \cos \delta - i_{q_1} \sin \delta \\ \dot{\psi}_{q_1} &= -\dot{\psi}_d \sin \delta + \dot{\psi}_q \cos \delta; \quad i_q = i_{d_1} \sin \delta + i_{q_1} \cos \delta \end{aligned} \right\} \quad (11.2)$$

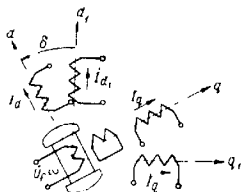


Рис. 54. Схема селсина с повернутыми контурами.

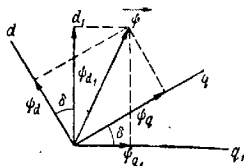


Рис. 55. Преобразование потоко-сцеплений селсина при повороте осей d и q .

Пользуясь выражениями (9.15) и этими формулами, легко получим:

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_{d_1} &= j \dot{E}_\Phi \cos \delta + [x_d(j) \cos^2 \delta + x_q(j) \sin^2 \delta] i_{d_1} + \\ &\quad + [x_q(j) - x_d(j)] \cos \delta \sin \delta i_{q_1}; \\ \dot{\psi}_{q_1} &= -j \dot{E}_\Phi \sin \delta + [x_q(j) \cos^2 \delta + x_d(j) \sin^2 \delta] i_{q_1} + \\ &\quad + [x_q(j) - x_d(j)] \cos \delta \sin \delta i_{d_1}, \end{aligned}$$

или, произведя некоторые тригонометрические преобразования:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_{d_1} &= j \dot{E}_\Phi \cos \delta + [x_c(j) + x_u(j) \cos 2\delta] i_{d_1} - \\ &\quad - x_u(j) \sin 2\delta i_{q_1} \\ \dot{\psi}_{q_1} &= -j \dot{E}_\Phi \sin \delta + [x_c(j) - x_u(j) \cos 2\delta] i_{q_1} - \\ &\quad - x_u(j) \sin 2\delta i_{d_1} \end{aligned} \right\} \quad (11.3)$$

где

$$x_c(j) = \frac{x_d(j) + x_q(j)}{2}; \quad x_u(j) = \frac{x_d(j) - x_q(j)}{2}.$$

Уравнения (11.1) вместе с формулами (11.3) представляют собой искомые уравнения э. д. с. селсина в осях d_1 и q_1 .

Момент на валу селсина может быть подсчитан по обычной формуле:

$$M = -\frac{3}{2} Re (\dot{\psi}_{d_1} i_{q_1}^* - \dot{\psi}_{q_1} i_{d_1}^*). \quad (11.4)$$

Подставляя сюда выражения (11.3), будем иметь:

$$\begin{aligned} M = & -\frac{3}{2} Re [jE_\Phi (\dot{I}_{q_1}^* \cos \vartheta + \dot{I}_{d_1}^* \sin \vartheta) + \\ & + x_c(j) (\dot{I}_{d_1} i_{q_1}^* - \dot{I}_{q_1} i_{d_1}^*) + x_n(j) \cos 2\vartheta (\dot{I}_{d_1} i_{q_1}^* + \dot{I}_{q_1} i_{d_1}^*) - \\ & - x_n(j) \sin 2\vartheta (I_{q_1}^2 - I_{d_1}^2)]. \end{aligned} \quad (11.5)$$

Полученное выражение, несмотря на его некоторую громоздкость, позволит в дальнейшем сравнительно просто подойти к вычислению синхронизирующих моментов для системы парной синхронной связи.

§ 12. СИСТЕМА СИНХРОННОЙ СВЯЗИ ПРИ МАЛОМ УГЛЕ РАССОГЛАСОВАНИЯ В РЕЖИМЕ ПОВОРОТА ($\nu = 0$)

А. Парная работа селсинов

Рассмотрим вначале систему парной синхронной связи. Будем считать, что датчик и приемник имеют различные параметры и рассогласованы на малый угол θ (рис. 56). Предположим, что в согласованном положении в цепи синхронизации селсинов отсутствуют уравнительные токи; это означает, что фазные значения э. д. с. синхронизирующих обмоток датчика и приемника одинаковы по величине и фазе.

Как и ранее, величины, относящиеся к датчику, обозначаются индексом 1, а величины, относящиеся к приемнику, — индексом 2.

Уравнения для э. д. с. цепей d и q запишем в виде:

$$\dot{U}_{d_1} = \dot{U}_{d_2}; \quad \dot{U}_{q_1} = \dot{U}_{q_2}, \quad (12.1)$$

где

$\dot{U}_{d_1}$, $\dot{U}_{q_1}$ — напряжения на датчике, определяемые формулами (11.1) и (11.3);

$\dot{U}_{d_2}$, $\dot{U}_{q_2}$ — напряжения на приемнике, определяемые формулами (9.14) и (9.15).

Подставляя значения $\dot{U}_{d_1}$, $\dot{U}_{q_1}$; $\dot{U}_{d_2}$, $\dot{U}_{q_2}$ из указанных формул в равенства (12.1) и учитывая $\dot{I}_{d_2} = -\dot{I}_{d_1}$; $\dot{I}_{q_2} = -\dot{I}_{q_1}$ (рис. 56), получим при $v=0$:

$$\begin{aligned} & [r_1 + r_2 + jx_{d_2}(j) + jx_{c_1}(j) + jx_{u_1}(j) \cos 2\theta] \dot{I}_{d_2} - \\ & - jx_{u_1}(j) \sin 2\theta \dot{I}_{q_2} = \dot{E}_\Phi (1 - \cos \theta); \\ & - jx_{u_1}(j) \sin 2\theta \dot{I}_{d_2} + [r_1 + r_2 + jx_{q_2}(j) + jx_{c_1}(j) - \\ & - jx_{u_1}(j) \cos 2\theta] \dot{I}_{q_2} = \dot{E}_\Phi \sin \theta. \end{aligned}$$

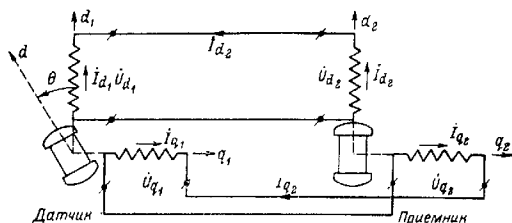


Рис. 56. Схема синхронной передачи, приведенная к осям d и q , при наличии рассогласования.

Принимая, что угол рассогласования θ — величина малая и, следовательно, $\cos \theta \approx 1$; $\sin \theta \approx \theta$, для токов в контурах d_2 и q_2 получим выражения:

$$\begin{aligned} \dot{I}_{d_2} & \approx 0; \\ \dot{I}_{q_2} & = \frac{\dot{E}_\Phi \theta}{r_1 + r_2 + jx_{q_1}(j) + jx_{q_2}(j)} = \frac{\dot{E}_\Phi \theta}{r'_{q_1} + r'_{q_2} + j(x'_{q_1} + x'_{q_2})}. \end{aligned} \quad (12.2)$$

Синхронизирующий момент приемника получим путем подстановки выражения (12.2) в формулу (9.18'):

$$M_2 = -\frac{3}{2} \operatorname{Re} \frac{jE_\Phi^2 \theta}{r'_{q_1} + r'_{q_2} + j(x'_{q_1} + x'_{q_2})} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \omega \partial M,$$

или, произведя вычисления,

$$M_2 = \frac{3}{2} E_\Phi^2 \frac{(x'_{q_1} + x'_{q_2}) \theta}{(r'_{q_1} + r'_{q_2})^2 + (x'_{q_1} + x'_{q_2})^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \omega \partial M. \quad (12.3)$$

Удельный момент приемника будет равен:

$$m = \frac{3}{2} E_\Phi^2 \frac{x'_{q_1} + x'_{q_2}}{(r'_{q_1} + r'_{q_2})^2 + (x'_{q_1} + x'_{q_2})^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360f} \frac{\omega \partial M}{\partial \theta}. \quad (12.4)$$

Точно такие же выражения получаются для синхронизирующего и удельного моментов датчика из формулы (11.5), если пренебречь в ней членами с θ^2 .

В случае работы однотипных датчика и приемника:

$$r'_{q1} = r'_{q2} = r'_q; \quad x'_{q1} = x'_{q2} = x'_q;$$

при этом формула (12.4) примет вид:

$$m_0 = \frac{3}{4} E_{\Phi}^2 \frac{x'_q}{r_q'^2 + x_q'^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360f} = \frac{2,12}{f} E_{\Phi}^2 \frac{x'_q}{r_q'^2 + x_q'^2} \frac{\text{гдм}}{\text{град}}, \quad (12.4')$$

что совпадает с полученным выше выражением (5.18).

Из формул (12.4) и (12.4') следует, что удельный синхронизирующий момент не зависит от параметров продольной оси r'_d и x'_d . Это вполне соответствует физической картине явлений, рассмотренных в главе I. Действительно, при малых углах рассогласования θ уравнительные токи, как было показано выше, являются почти чисто поперечными и не оказывают воздействия по продольной оси. Поэтому вполне естественно, что параметры селсина по продольной оси не входят в выражение для удельного момента.

Удельный момент пропорционален квадрату фазной э. д. с. селсина, а, следовательно, и квадрату магнитного потока по оси Φ_d , так как $\Phi_d \sim E_{\Phi}$.

Рассмотрим, как изменяется удельный момент при изменении параметров r'_q и x'_q .

Первоначально предположим, что E_{Φ} и r'_q неизменны и изменяется только x'_q .

Определяя по формуле (12.4') значения удельного момента для различных $\frac{x'_q}{r'_q}$, приняв удельный момент при $x'_q = r'_q$ равным единице, получим кривую зависимости удельного момента от $\frac{x'_q}{r'_q}$ (см. рис. 57).

Из этой кривой видно, что удельный момент имеет максимальное значение при $x'_q = r'_q$. При меньших и больших значениях x'_q удельный момент падает. Однако при уменьшении

отношения $\frac{x'_q}{r'_q}$ относительно единицы падение удельного момента происходит значительно быстрее, чем при увеличении.

Из сказанного следует, что при проектировании селсинов для получения наибольшего удельного момента необходимо добиваться, чтобы $x'_q = r'_q$.

Теперь предположим, что постоянны E_{Φ} и x'_q , а r'_q изменяется. Как и в предыдущем случае, по формуле (12.4')

определяем удельный момент при различных значениях $\frac{r'_q}{x'_q}$, приняв за единицу удельный момент при $r'_q = x'_q$.

На основе результатов расчета построена кривая, (рис. 58), из которой следует, что при увеличении r'_q для любого x'_q удельный синхронизирующий момент уменьшается.

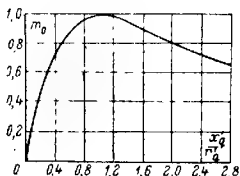


Рис. 57. Зависимость удельного момента селсина от отношения $\frac{x'_q}{r'_q}$ при $r'_q = \text{const.}$

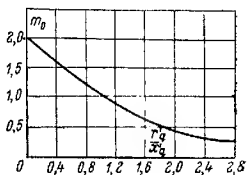


Рис. 58. Зависимость удельного момента селсина от отношения $\frac{r'_q}{x'_q}$ при $x'_q = \text{const.}$

Подытоживая всё сказанное, можно сформулировать следующее простое правило: для получения наибольшего удельного момента селсина, при заданной э.д.с. фазной обмотки E_Φ , необходимо уменьшить активное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки по поперечной оси r'_q до возможного минимума, а ее реактивное сопротивление по поперечной оси x'_q иметь равным r'_q .

Эти требования являются одними из основных требований, которые определяют устройство магнитной цепи селсинов, а также их конструктивное исполнение.

Б. Параллельная работа селсинов-приемников

Перейдем теперь к рассмотрению системы синхронной связи при работе n однотипных приемников от одного датчика. Как и в случае одного приемника, угол рассогласования считаем малым, а фазные значения э.д.с. синхронизирующих обмоток датчика и приемников — равными по величине и фазе.

Составляем уравнения э.д.с. для контура, состоящего из одного приемника и датчика (рис. 59), учитывая при этом, что

$$i_{q_1} = -n i_{q_2}; \quad i_{d_1} = -n i_{d_2}.$$

Аналогично предыдущему получим:

$$\begin{aligned}
 & [r_1 n + r_2 + jx_{d_2}(j) + jnx_{c_1}(j) + jnx_{n_1}(j) \cos 2\theta] \dot{I}_{d_2} - \\
 & - jnx_{u_1}(j) \sin 2\theta \dot{I}_{q_2} = \dot{E}_\Phi (1 - \cos \theta); \\
 & - jnx_{u_1}(j) \sin 2\theta \dot{I}_{d_2} + [r_1 n + r_2 + jx_{q_2}(j) + jnx_{c_1}(j) - \\
 & - jx_{u_1}(j) \cos 2\theta] \dot{I}_{q_2} = \dot{E}_\Phi \sin \theta.
 \end{aligned}$$

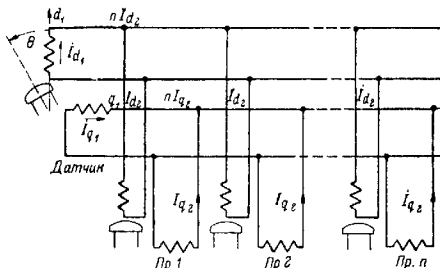


Рис. 59. Схема синхронной передачи в осях d и q при параллельной работе n приемников.

Решая эти уравнения относительно токов приемника $\dot{I}_{d_2}$ и $\dot{I}_{q_2}$ и пренебрегая членами с θ^2 , будем иметь

$$\dot{I}_{d_2} \approx 0; \quad (12.5)$$

$$\dot{I}_{q_2} = \frac{\dot{E}_\Phi \theta}{r_1 n + r_2 + jnx_{q_1}(j) + jx_{q_1}(j)} = \frac{\dot{E}_\Phi \theta}{r'_{q_1} n + r'_{q_2} + j(x'_{q_1} n + x'_{q_2})}.$$

Подставляя это выражение в формулу для синхронизирующего момента приемника (9.18'), точно так же, как и выше, приходим к следующему выражению для удельного момента приемника при параллельной работе:

$$m = \frac{3}{2} E_\Phi^2 \frac{x'_{q_1} n + x'_{q_2}}{(r'_{q_1} n + r'_{q_2})^2 + (x'_{q_2} n + x'_{q_2})^2} \cdot \frac{1.02 \cdot 10^3}{360 f} \frac{2d_m}{2\rho a \delta}. \quad (12.6)$$

Сравнивая формулы (12.6) и (12.4), легко можно заметить, что в смысле величины удельного момента система синхронной связи с n однотипными приемниками эквивалентна системе парной синхронной связи с одним приемником, при условии увеличения параметров датчика в поперечной оси в n раз.

Из формулы (12.6) следует, что удельный момент приемника при параллельной работе нескольких однотипных приемников зависит от параметров приемника — r'_{q2} , x'_{q2} , параметров датчика — r'_{q1} , x'_{q1} и числа приемников n .

Рассмотрим, как будет изменяться величина удельного момента при изменении числа приемников. Вначале положим, что в качестве датчика используется селсин, однотипный с селсином-приемником. В этом случае будем иметь:

$$r'_{q1} = r'_{q2} = r'_q; \quad x'_{q1} = x'_{q2} = x'_q.$$

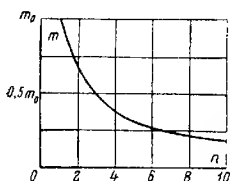


Рис. 60. Зависимость удельного момента от числа приемников при работе с однотипным датчиком.

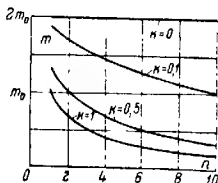


Рис. 61. Зависимость удельного момента от числа приемников при работе с датчиками разной мощности.

Формула (12.6) запишется в виде:

$$m = \frac{3}{4} E_{\Phi}^2 \frac{x'_q}{r'^2_q + x'^2_q} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360 f} \cdot \frac{2}{1+n} = m_0 \frac{2}{1+n}, \quad (12.7)$$

где m_0 — удельный момент приемника при парной работе от однотипного датчика, т. е. удельный момент при $n=1$.

На рис. 60 для этого случая построена кривая зависимости удельного момента приемника от числа принимающих селсинов. Заметим, что кривая имеет физический смысл только для отдельных точек, для которых n является целым числом; однако она наглядно показывает изменение удельного момента при изменении числа принимающих селсинов.

Теперь рассмотрим случай, когда параметры датчика отличны от параметров приемника. Положим, что

$$x'_{q1} = kx'_{q2}; \quad r'_{q1} = kr'_{q2}. \quad (12.8)$$

Данные равенства означают, что треугольники сопротивлений в поперечной оси датчика и приемника подобны. В правильно спроектированных селсинах это, как правило, имеет место.

Обычно, при параллельной работе, в качестве датчика берется селсин, размеры которого больше размеров селсиновых приемников, а значения параметров датчика r'_{q1} и x'_{q1} меньше параметров приемников r'_{q2} и x'_{q2} . Поэтому множитель k всегда меньше единицы.

Подставляя соотношения (12.8) в формулу (12.6), получим

$$m = \frac{3}{4} E_{\Phi}^2 \frac{x'_{q2}}{r'^2_{q2} + x'^2_{q2}} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360 f} \cdot \frac{2}{1 + nk} = m_0 \frac{2}{1 + nk}. \quad (12.9)$$

При равенстве параметров датчика и приемника ($k=1$) формула (12.9) переходит в формулу (12.7).

На рис. 61 приведены кривые зависимости удельного момента от числа приемников для различных значений $k=0,1; 0,5; 1,0$, построенные по формуле (12.9). Из кривых видно, что чем меньше k , т.е. чем меньше сопротивления датчика r'_{q1} , x'_{q1} по сравнению с сопротивлениями приемника r'_{q2} , x'_{q2} , тем менее резко уменьшается удельный момент с увеличением числа приемников.

В табл. 1 приведены значения удельных моментов, выраженные в долях m_0 для $n=1$ и 10 при различных значениях k

Из таблицы легко видеть, что при $n=1$ удельный момент приемника при работе от датчика с $k=0,1$ превышает удельный момент при работе с датчиком, у которого $k=1$, в 1,82 раза, в то время как при $n=10$ — в 5,5 раза.

Отметим, что для датчика бесконечно большой мощности ($r'_{q1}=x'_{q1}=0$) удельный момент приемников не зависит от их числа и равен $2 m_0$, т.е. вдвое превышает удельный момент при работе от одиотипного датчика.

Таблица 1

$n \backslash k$	1,0	0,5	0,1
1	1	1,33	1,82
10	0,182	0,33	1,0

§ 13. УДЕЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ СЕЛСИНА В ПОПЕРЕЧНОЙ ОСИ

При рассмотрении параллельной работы селсинов важно уметь определить, какое количество приемников может быть подключено к данному датчику и каков будет при этом удельный момент. Формула (12.9) позволяет дать ответ на этот вопрос. Как было показано в предыдущем параграфе, при заданных фазных э.д.с. датчиков достаточное представление о мощности датчика, т.е. о его способности обеспечить тот или иной момент на осях приемников, дают его параметры r'_{q1} и x'_{q1} . Чем меньше параметры r'_{q1} и x'_{q1} , тем больший

момент на оси приемника обеспечивает данный датчик и, следовательно, тем больше его мощность.

Однако, при сравнении селсинов-датчиков с различными фазными э.д.с. неправильно оценивать их мощность только по параметрам r'_{q1} и x'_{q1} , так как удельный момент прямо пропорционален квадрату фазной э.д.с. и обратно пропорционален суммарному сопротивлению по поперечной оси датчика и приемника.

Поэтому практически оказывается более удобным оценивать мощность датчика путем введения понятия об удельной мощности селсина в поперечной оси.

Синхронизирующий момент приемника при малом угле расхождения определяется током $\dot{I}_{q2}$ в поперечной оси селсина (формула 12.3):

$$I_{q2} = \frac{\dot{E}_\Phi \sin \theta}{n\dot{z}_{q1} + \dot{z}_{q2}}, \quad (13.1)$$

а также продольным потоком $\Phi_d \sim \dot{E}_\Phi$ и вычисляется по формуле

$$M_2 = -\frac{3}{2} Re(j\dot{E}_\Phi \dot{I}_{q2}^*) = \frac{3}{2} Re(j\dot{E}_\Phi^* \dot{I}_{q2}).$$

Подставляя сюда (13.1), получим

$$M_2 = \frac{3}{2} Re \frac{jE_\Phi^2}{n\dot{z}_{q1} + \dot{z}_{q2}} \sin \theta$$

и, соответственно, для удельного момента

$$m = \frac{3}{2} Re \frac{jE_\Phi^2}{n\dot{z}_{q1} + \dot{z}_{q2}}. \quad (13.2)$$

При парной работе селсина от однотипного датчика $n=1$ и $\dot{z}_{q1} = \dot{z}_{q2}$ формула (13.2) принимает вид

$$m_0 = \frac{3}{4} Re \frac{jE_\Phi^2}{\dot{z}_{q2}}. \quad (13.3)$$

Из приведенных формул следует, что удельный момент селсина-приемника определяется выражением типа $\frac{E_\Phi^2}{\dot{z}_q}$, имеющим размерность мощности.

Поэтому в качестве одной из характеристик селсина представляется целесообразным ввести понятие об удельной мощности в поперечной оси:

$$P_q = \lim_{\theta \rightarrow 0} \frac{3}{2} \frac{E_\Phi^2 \sin^2 \theta}{\dot{z}_q \theta^2} = \frac{3}{2} \frac{E_\Phi^2}{\dot{z}_q}. \quad (13.4)$$

Обычно удельную мощность принято выражать в $\frac{мва}{град^2}$, тогда

$$P_q = 0,457 \frac{E_{\Phi}^2}{z_q'} . \quad (13.4')$$

Удельная мощность представляет собой полную мощность в цепи синхронизации селсина при рассогласовании его на 1° относительно второго селсина, имеющего нулевые значения параметров (бесконечно мощный селсин).

Из формулы (13.4) следует, что чем меньше при данном напряжении в обмотке синхронизации параметры селсина в поперечной оси, тем больше его удельная мощность.

Удельная мощность для большинства селсинов имеет простую связь с удельным моментом приемника при парной работе от однотипного датчика. Действительно, между параметрами r_q' и x_q' в поперечной оси для правильно спроектированного

селсина существует соотношение: $r_q' \approx x_q' \approx \frac{z_q'}{\sqrt{2}}$, являющееся условием максимума удельного момента селсина.

Удельный момент в $\frac{з\delta м}{град}$ выражается формулой (12.4')

$$m_0 = \frac{3}{4} E_{\Phi}^2 \frac{x_q'}{r_q'^2 + x_q'^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360f} = \frac{3}{2} \cdot \frac{E_{\Phi}^2}{z_q'} \cdot \frac{x_q'}{z_q'} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{720f} \frac{з\delta м}{град}$$

или, используя формулу (13.4') и соотношение $\frac{x_q'}{z_q'} = \sqrt{2}$, получим

$$m_0 \approx 3,3 \frac{P_q}{f} , \quad (13.5)$$

где P_q в $\frac{мва}{град^2}$, а m_0 в $\frac{з\delta м}{град}$.

С помощью понятия удельной мощности несколько преобразуем формулу (13.2) для удельного момента приемника при параллельной работе. Имеем

$$m = \frac{3}{4} Re \frac{jE_{\Phi}^2}{z_{q2}} \cdot \frac{2}{1 + n \frac{z_{q1}}{z_{q2}}} .$$

Величину $\beta = \frac{z_{q2}}{z_{q1}} = \frac{P_{q1}}{P_{q2}}$ — отношение удельных мощностей датчика и приемника можно считать величиной вещественной

вследствие подобия параметров селсинов. Тогда последняя формула примет вид:

$$m = \frac{2}{1 + \frac{n}{\beta}} \cdot \frac{3}{4} Re \frac{jE_{\Phi}^2}{z_{q_2}} = \frac{2}{1 + \frac{n}{\beta}} m_0. \quad (13.6)$$

Эта формула и позволяет по двум параметрам синхронной передачи: m_0 — удельного момента приемника от однотипного датчика и β — отношения удельных мощностей датчика и приемника определять удельный момент при параллельной работе.

Удельные мощности селсинов весьма просто определяются экспериментальным путем (см. § 43).

Из изложенного следует, что удельная мощность датчика является весьма важным параметром, характеризующим способность датчика обеспечивать параллельную работу того или иного числа приемников или его мощность.

Конечно, удельная мощность не имеет ничего общего с мощностью возбуждения, потребляемой селсином из сети. Последняя, в отличие от удельной мощности, не характеризует мощности датчика. Можно указать селсины-датчики с большой потребляемой мощностью и низкой удельной мощностью и, наоборот, селсины с малой потребляемой мощностью и сравнительно высоким значением удельной мощности.

Удельная мощность по поперечной оси дает возможность объективно оценивать и сравнивать между собой селсины-датчики. Если один из селсинов обладает большой удельной мощностью при данной частоте по сравнению с другими, то можно сказать, что он обеспечит больший удельный момент на оси приемников при параллельной работе и лучшую работу системы синхронной связи.

Удельная мощность является удобной характеристикой при сравнении между собой селсинов, предназначенных для работы от сети с одинаковой частотой. При сравнении селсинов, предназначенных для работы от сетей с различными частотами, следует учитывать уравнение (13.5), которое показывает, что удельный момент m_0 селсинов с одинаковой удельной мощностью P_q обратно пропорционален частоте сети f .

§ 14. ПАРНАЯ РАБОТА СЕЛСИНОВ ПРИ ЛЮБЫХ УГЛАХ РАССОГЛАСОВАНИЯ

В настоящем параграфе рассматривается парная работа системы синхронной связи при однотипных датчике и приемнике как в режиме поворота, так и в режиме вращения.

В силу симметрии электромагнитных процессов в датчике и приемнике, при составлении уравнений системы целесооб-

разно угол рассогласования между датчиком и приемником располовинить (рис. 62).

Преимущества такого выбора системы координат будут ясны из дальнейшего.

Уравнения э. д. с. подобной системы синхронной связи легко могут быть составлены на основании выражений, приведенных в § 11.

Имеем

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{d_1} &= \dot{U}_{d_2}; & \dot{U}_{q_1} &= \dot{U}_{q_2} \\ \dot{I}_{d_2} &= -\dot{I}_{d_1}; & \dot{I}_{q_2} &= -\dot{I}_{q_1} \end{aligned} \right\}. \quad (14.1)$$

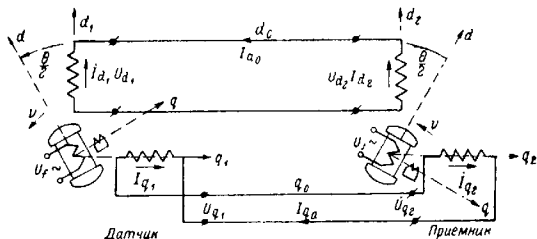


Рис. 62. Схема парной синхронной связи в осях d и q при повороте датчика и приемника на углы $\frac{\theta}{2}$ в разные стороны.

При составлении выражений для потокосцеплений обмоток ψ_{d_1} ; ψ_{q_1} ; ψ_{d_2} ; ψ_{q_2} можно воспользоваться формулами (11.3), заменив в них δ на $\frac{\theta}{2}$ для датчика и δ на $-\frac{\theta}{2}$ для приемника.

На основе соотношений (14.1) и формул (11.1) и (11.3) получим следующие уравнения э. д. с. для контуров d_0 и q_0

$$\begin{aligned} [r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{d_2} + v [x_c(j) - x_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{q_2} &= \\ = -jv \dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}; & (14.2) \\ -v [x_c(j) + x_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{d_2} + [r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{q_2} &= \\ = \dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}. \end{aligned}$$

Синхронизирующий момент приемника может быть вычислен по формуле (11.5) путем замены в ней δ на $-\frac{\theta}{2}$ и подстановки значения токов $\dot{I}_{d_2}$ и $\dot{I}_{q_2}$ вместо $\dot{I}_{d_1}$ и $\dot{I}_{q_1}$, полученных путем решения уравнений (14.2).

В общем виде, при любой скорости v , решение уравнений (14.2) и вычисление синхронизирующего момента приводит к весьма сложным выкладкам [34]. Поэтому ограничимся некоторыми частными случаями работы системы парной синхронной связи.

А. Режим синхронного поворота $v = 0$

Для этого случая, как следует из уравнений (14.2), имеем следующие выражения для токов:

$$\left. \begin{aligned} i_{d_2} &= 0 \\ i_{q_2} &= \frac{\dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}}{r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta} \end{aligned} \right\}. \quad (14.3)$$

Подставим эти значения токов в формулу для синхронизирующего момента приемника, получаемую из (11.5) заменой δ на $-\frac{\theta}{2}$:

$$M = -\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ j\dot{E}_\Phi \left(i_{q_2}^* \cos \frac{\theta}{2} - i_{d_2}^* \sin \frac{\theta}{2} \right) + x_c(j) (i_{d_2} i_{q_2}^* - i_{d_2}^* i_{q_2}) + \right. \\ \left. + x_u(j) \cos \theta (i_{d_2} i_{q_2}^* + i_{d_2}^* i_{q_2}) + x_u(j) \sin \theta (i_{q_2}^2 - i_{d_2}^2) \right\}. \quad (14.4)$$

Получим

$$M = -\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{j\dot{E}_\Phi^2 \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2}}{r - jx_c(-j) + jx_u(-j) \cos \theta} + \right. \\ \left. + \frac{x_u(j) \sin \theta \dot{E}_\Phi^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}{|r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta|^2} \right\} = \frac{3}{4} \frac{\dot{E}_\Phi^2 \sin \theta}{|r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta|^2} \times \\ \times \operatorname{Re} [-jr + x_c(j) - x_u(j) \cos \theta - x_u(j) (1 - \cos \theta)] = \\ = \frac{3}{4} \frac{\dot{E}_\Phi^2 \sin \theta}{|r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta|^2} x'_q,$$

так как

$$\operatorname{Re} [x_c(j) - x_u(j)] = \operatorname{Re} \left[\frac{x_d(j) + x_q(j)}{2} - \frac{x_d(j) - x_q(j)}{2} \right] = x'_q.$$

Несколько преобразуем знаменатель в полученной формуле синхронизирующего момента:

$$r + jx_c(j) = r + j \frac{x_d(j) + x_q(j)}{2} = \frac{r'_d + r'_q}{2} + j \frac{x'_d + x'_q}{2}; \\ jx_u(j) \cos \theta = j \frac{x_d(j) - x_q(j)}{2} \cos \theta = \\ = \left(\frac{r'_d - r'_q}{2} + j \frac{x'_d - x'_q}{2} \right) \cos \theta.$$

Подставляя эти выражения, получим окончательную формулу:

$$M = \frac{3}{4} E_{\Phi}^2 \frac{x'_q \sin \theta}{\left[\frac{r'_d + r'_q}{2} - \frac{r'_d - r'_q}{2} \cos \theta \right]^2 + \left[\frac{x'_d + x'_q}{2} - \frac{x'_d - x'_q}{2} \cos \theta \right]^2} \times \\ \times \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \text{ гДм.} \quad (14.5)$$

Последняя формула дает зависимость синхронизирующего момента селсина-приемника от угла рассогласования и параметров селсина. Точно такой же формулой, но с обратным знаком, выражается синхронизирующий момент датчика.

В зависимости от соотношения параметров селсина, кривая синхронизирующего момента $M = F(\theta)$ может иметь различный вид. Если параметры селсина удовлетворяют условию $x'_d = x'_q$; $r'_d = r'_q$, то кривая синхронизирующего момента представляет собой синусоиду с максимальным значением момента

$$M_{\max} = \frac{3}{4} \overline{E_{\Phi}^2} \frac{x'_q}{r_q'^2 + x_q'^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \text{ гДм.}$$

Для выяснения характера изменения кривой синхронизирующего момента при невыполнении условия $x'_d = x'_q$; $r'_d = r'_q$ рассмотрим ряд частных случаев.

1-й случай. Реактивное и активное сопротивление в поперечной оси x'_q и r'_q равны между собой и неизменны: $x'_q = r'_q = \text{const}$; реактивное и активное сопротивления по продольной оси x'_d и r'_d также равны между собой, но изменяются по величине $x'_d = r'_d = \text{var}$.

Обозначим отношение $\frac{x'_d}{x'_q} = \frac{r'_d}{r'_q}$ через ϵ . Тогда формула (14.5) примет вид

$$M = \frac{3}{2} \frac{E_{\Phi}^2}{r_q'} \cdot \frac{\sin \theta}{[\epsilon + 1 - (\epsilon - 1) \cos \theta]^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \text{ гДм.} \quad (14.6)$$

Приравнявая производную $\frac{dM}{d\theta}$ к нулю, находим, что синхронизирующий момент M , определяемый этой формулой, достигает наибольшего значения при угле θ_m , равном $\theta_m = \arccos \frac{\epsilon - 1}{\epsilon + 1}$.

Это означает, что для $\epsilon > 1$ максимум момента будет при угле $\theta_m < 90^\circ$, а для $\epsilon < 1$ — при угле $\theta_m > 90^\circ$.

Максимальное значение момента находится по формуле

$$M_{\max} = \frac{3}{16} \frac{E_{\Phi}^2}{r_q'} \cdot \frac{\varepsilon + 1}{\frac{\varepsilon}{2}} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \text{ гдм},$$

которая показывает, что с уменьшением ε , а, следовательно, с уменьшением параметров по продольной оси селсина, максимальный момент быстро

растет. На рис. 63 приведены кривые синхронизирующих моментов для различных ε , причем максимальное значение момента при $\varepsilon = 1$ принято за единицу.

2-й случай. Реактивное и активное сопротивление в продольной оси x_d' и r_d' равны между собой и неизменны $x_d' = r_d' = \text{const}$; реактивные и активные сопротивления по поперечной оси x_q' и r_q' также равны между собой, но изменяются по величине $x_q' = r_q' = \text{var}$.

Снова считая $\frac{x_d'}{x_q'} =$

$= \frac{r_d'}{r_q'} = \varepsilon$, формулу (14.6) перепишем в виде

$$M = \frac{3}{2} \frac{E_{\Phi}^2}{r_d'} \frac{\varepsilon \sin \theta}{[\varepsilon + 1 - (\varepsilon - 1) \cos \theta]^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \text{ гдм}. \quad (14.6')$$

Если, как и выше, принять за единицу максимальный момент при $\varepsilon = 1$, то кривые зависимости синхронизирующего момента от угла рассогласования, выражаемой формулой (14.6'), могут быть легко получены из кривых, представленных на рис. 63. Полученные кривые изображены на рис. 64.

Из рисунка следует, что при изменении ε в сравнительно больших пределах (0,5—1,5) максимальный синхронизирующий момент остается практически постоянным. Однако удельный момент сильно изменяется, что согласуется с результатами § 12.

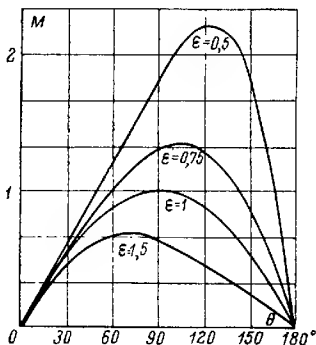


Рис. 63. Кривые синхронизирующих моментов для различных отношений

$$\varepsilon = \frac{x_d'}{x_q'} = \frac{r_d'}{r_q'} \text{ при } x_q' = r_q' = \text{const}.$$

3-й случай. Параметры продольной оси селсина x'_d и r'_d постоянны и равны между собой и в два раза превосходят активное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки; активное сопротивление в поперечной оси постоянно и равно сопротивлению фазы $r'_q = r$.

Реактивное же сопротивление x'_q может меняться в широких пределах, что обычно бывает в явиополусном селсине без электрического демпфера при изменении его полюсной дуги.

Обозначим $\frac{x'_q}{r} = \nu$, тогда формулу (14.5) для данных соотношений параметров преобразуем к виду

$$M = 3 \frac{E_\Phi^2}{r} \cdot \frac{\nu \sin \theta}{(3 - \cos \theta)^2 + [(2 + \nu) - (2 - \nu) \cos \theta]^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \text{ гдм. (14.6'').}$$

При $\nu = 1$, что соответствует максимальному значению удельного момента, формула (14.6'') имеет более простой вид:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{E_\Phi^2}{r} \cdot \frac{\sin \theta}{(3 - \cos \theta)^2} \times \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \text{ гдм.}$$

На рис. 65 построены кривые синхронизирующих моментов по формуле (14.6''); при этом за единицу момента принято значение максимального синхронизирующего момента при $\nu = 1$. Из кривых следует, что с ростом ν максимальное значение момента растет и сдвигается в сторону больших углов рассогласования.

Рассмотренные три частных случая изменения параметров селсинов позволяют судить о том, как будет изменяться кривая синхронизирующего момента селсина при переходе от одного соотношения между параметрами к другому.

В зависимости от соотношения параметров, являющегося

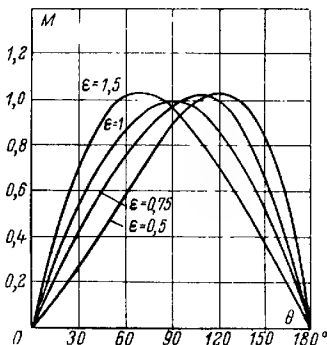


Рис. 64. Кривые синхронизирующих моментов для различных

$$\epsilon = \frac{x'_d}{x'_q} = \frac{r'_d}{r_q} \text{ при } r'_d = x'_d = \text{const.}$$

следствием конструкции селсинов, существующие типы селсинов можно условно разбить на четыре группы:

- 1) $r'_d = r'_q$; $x'_d = x'_q$ — неявнополюсные селсины с электрическим демпфером;
- 2) $r'_d > r'_q = r$; $x'_d < x_q$ — неявнополюсные селсины без электрического демпфера;
- 3) $r'_d > r'_q = r$; $x'_d \approx x_q$ — явнополюсные селсины без электрического демпфера;
- 4) $r'_d = r'_q$; $x'_d \geq x'_q$ — явнополюсные селсины с электрическим демпфером.

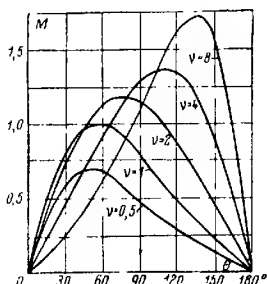


Рис. 65. Кривые синхронизирующих моментов для различных

$$\nu = \frac{x_q}{r} \quad \text{при} \quad r'_d = x'_d \approx 2r = \text{const.}$$

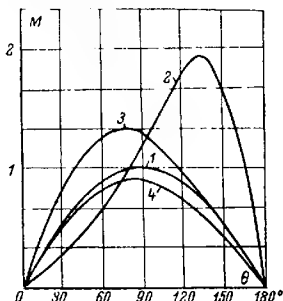


Рис. 66. Кривые синхронизирующих моментов для случаев:

- 1) $r'_d = r'_q$; $x'_d = x'_q$;
- 2) $r'_d > r'_q = r$; $x'_d < x_q$;
- 3) $r'_d > r'_q = r$; $x'_d = x_q$;
- 4) $r'_d = r'_q$; $x'_d \geq x'_q$.

На рис. 66 построены кривые синхронизирующих моментов каждой из этих групп для следующего соотношения между параметрами: $x'_d = r'_d = 2r$; $x_q = 4x'_d$ (для второй группы); $x'_q \approx 0,8 x'_d$ (для четвертой группы).

Эти кривые показывают характер изменения кривой синхронизирующего момента для селсинов разных групп только с качественной стороны.

Сделаем еще одно замечание по поводу формулы (14.5), выведенной без пренебрежения каким-либо параметрами селсина. Как видно из формулы (14.5), в ней нет члена, пропорционального разности $x_d - x_q$, т. е. так называемого реактив-

ного момента. Предположение о существовании в системе синхронной связи явнополюсных селсинов реактивного момента, подобного тому, какой существует в синхронных машинах, впервые высказано Линвилем [47] и является ошибочным. На это было еще указано Штурманом [31]. Однако ряд авторов [20] считает соображения Штурмана неубедительными в силу того, что последний проводил анализ систем синхронной связи на неявнополюсных селсинах.

Тот факт, что в обычной системе синхронной связи нет реактивных моментов, уже следует из того, что в селсине, подключенном к сети переменного тока, нет параметра x_d . В самом деле, при рассогласовании селсинов магнитный поток трехфазной обмотки пульсирует с частотой сети. Обмотка возбуждения замкнута накоротко через питающую сеть. Поэтому для магнитного потока трехфазной обмотки магнитные проводимости будут не λ_d и λ_q , как в синхронных машинах при постоянном магнитном потоке, а некоторые переходные проводимости λ'_d и λ'_q , величины которых зависят не только от явнополюсной структуры ротора, но и от параметров короткозамкнутых обмоток: возбуждения и демпферной.

Отсюда следует, что синхронизирующий момент приемника может зависеть от разности $x'_d - x'_q$, на что и указывает формула (14.5).

Если же обмотка возбуждения приемника разомкнута и в явнополюсном селсине нет демпферной обмотки, то синхронизирующий момент будет пропорционален $x'_d - x'_q$, т. е. иметь чисто реактивное происхождение (см. § 17).

Что касается соображений, высказываемых в некоторых руководствах по поводу преимуществ применения в схемах синхронной связи явнополюсных селсинов по сравнению с неявнополюсными, то они объясняются, на наш взгляд, другой причиной. В режиме синхронного поворота на точность системы оказывает существенное влияние величина удельного момента. Удельный момент максимален, если $x'_q = r'_q$; при этом удельный момент тем больше, чем меньше r'_q [см. формулу (12.4)]. Для выполнения условия $x'_q = r'_q$ в селсинах необходимо уменьшать индуктивное сопротивление фазы трехфазной обмотки в поперечной оси x'_q . Это можно осуществить двумя способами: устраивать явновыраженные полюса или ставить демпферную обмотку в поперечной оси селсина. Если первый способ уменьшения x'_q не связан с каким-либо увеличением r'_q (в этом случае $r'_q = r$), то при втором способе активное сопротивление r'_q возрастает, так как $r'_q = r + \tau_k r_k$ (см. формулу 10.11). Это и обуславливает тот факт, что явнополюсные селсины имеют несколько большие значения удельных моментов, чем неявнополюсные, выполненные в тех же габаритах.

Прежде чем закончить с режимом синхронного поворота, приведем выражения для тока возбуждения и фазных токов в синхронизирующей обмотке при наличии рассогласования.

Чтобы найти ток возбуждения селсина, воспользуемся первым уравнением (9.10)

$$I_f = \frac{U_f - j \frac{3}{2} x_{af} i_d}{r_f + j x_f},$$

где I_d — ток в продольном контуре d селсина.

Проектируя токи I_{d_2} и I_{q_2} селсина-приемника на его продольную ось (см. рис. 62), получим:

$$I_d = I_{d_2} \cos \frac{\theta}{2} + I_{q_2} \sin \frac{\theta}{2}.$$

Подставляя сюда выражения (14.3), будем иметь:

$$I_d = \frac{\dot{E}_\Phi \sin^2 \frac{\theta}{2}}{r + j [x_c(j) - x_u(j) \cos \theta]} = \frac{-j x_{af} \dot{U}_f \sin^2 \frac{\theta}{2}}{(r_f + j x_f) \{r + j [x_c(j) - x_u(j) \cos \theta]\}},$$

так как

$$\dot{E}_\Phi = - \frac{j x_{af}}{r_f + j x_f} \dot{U}_f = - \frac{j x_{af}}{z_f} \dot{U}_f.$$

Таким образом, для тока возбуждения селсина-приемника получаем формулу

$$I_f = \frac{\dot{U}_f}{z_f} \left\{ 1 - \frac{3}{2} \frac{x_{af}^2}{z_f} \frac{\sin^2 \frac{\theta}{2}}{r + j [x_c(j) - x_u(j) \cos \theta]} \right\}. \quad (14.7)$$

Выражение, стоящее в фигурных скобках, представляет собой относительное увеличение тока возбуждения селсина при рассогласовании по сравнению с током возбуждения в согласованном состоянии (ток намагничивания). Поскольку второй член в скобках есть величина комплексная, то ток возбуждения изменяется как по величине, так и по фазе. Максимального значения ток возбуждения достигает при $\theta = 180^\circ$. Оно равно

$$I_{fm} = I_{fo} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{x_{af}^2}{(r_f + j x_f) [r + j x_d(j)]} \right],$$

где $I_{fo} = \frac{\dot{U}_f}{z_f}$ — ток возбуждения селсина в согласованном состоянии.

Точно такая же зависимость тока возбуждения от угла рассогласования имеет место и для датчика.

Перейдем теперь к определению фазных токов синхронизирующей обмотки. Из формул преобразования Горева-Парка (8.3) имеем, например, для фазы А:

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma.$$

Выражая токи i_d и i_q , отнесенные к осям d и q приемника, через токи i_{d_2} и i_{q_2} по формулам (11.2), заменив в них δ на $-\frac{\theta}{2}$, получим

$$i_A = \cos \gamma \left(i_{d_2} \cos \frac{\theta}{2} + i_{q_2} \sin \frac{\theta}{2} \right) + \sin \gamma \left(-i_{d_2} \sin \frac{\theta}{2} + i_{q_2} \cos \frac{\theta}{2} \right) = i_{d_2} \cos \left(\frac{\theta}{2} - \gamma \right) + i_{q_2} \sin \left(\frac{\theta}{2} + \gamma \right). \quad (14.8)$$

Подставляя сюда значения токов i_{d_2} и i_{q_2} из формул (14.3), найдем

$$i_A = \frac{E_\Phi \sin \frac{\theta}{2} \sin \left(\frac{\theta}{2} + \gamma \right)}{r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta}. \quad (14.8')$$

Аналогичные выражения получаются для других двух фаз заменой γ на $\gamma - \frac{2}{3}\pi$ и $\gamma + \frac{2}{3}\pi$.

Из формулы (14.8') получаем искомую зависимость фазных токов от угла рассогласования и положения ротора относительно фаз трехфазной обмотки

$$I_A = \frac{E_\Phi \sin \frac{\theta}{2} \sin \left(\frac{\theta}{2} + \gamma \right)}{\left[\left(\frac{r'_d + r'_q}{2} - \frac{r'_d - r'_q}{2} \cos \theta \right)^2 + \left(\frac{x'_d + x'_q}{2} - \frac{x'_d - x'_q}{2} \cos \theta \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}. \quad (14.9)$$

Аналогичные выражения можно получить для двух других фаз.

Из последней формулы следует, что ток в фазе А, при данном угле рассогласования, имеет максимальное значение, если продольная ось ротора повернута относительно фазы А на угол $\gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}$. Это значение тока (максимальное значение) целесообразно определять как функцию угла рассогласования при экспериментальном исследовании селсинов. Максимальное значение тока фазы достигает наибольшей величины при угле рассогласования $\theta = 180^\circ$.

Между тем ряд авторов руководств по селси́нам, приводи зависимо́сти фазных токов от угла рассогласования, не учи- тывает того факта, что фазные токи зависят еще и от угла γ , определяющего положение оси фазы синхронизирующей об- мотки относительно оси возбуждения.

На рис. 67 приведены кривые зависимости тока возбужде- ния и максимального значения тока в фазе как функции угла рассогласования для селси́нов 1-й группы, т. е. для сел- си́нов, параметры которых удов- летворяют соотношениям $r'_q = -r'_d$; $x'_d = x'_q$.

При этом за единицу тока возбуждения принят I_{f_0} — ток в согласованном состоянии, а за единицу тока в фазе — maxi- мальное значение тока фазы при рассогласовании на 180° .

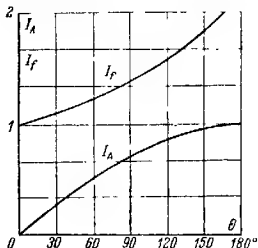


Рис. 67. Зависимость тока возбуж- дения и максимального фазного тока от угла рассогласования.

Б. Режим вращения с синхронной скоростью $v = 1$

Рассмотрение этого режима работы системы синхронной свя- зи имеет не только теорети- ческий, но и практический инте- рес, так как позволяет оценить величины синхронизирующих и удельных моментов при больших скоростях вращения.

В ряде работ [10], [47] указывается, что синхронизирующий момент селси́на-приемника сильно уменьшается при больших скоростях вращения; однако количественная оценка этого уменьшения не приводится. Между тем, на основании фор- мул (14.2) сравнительно легко получить выражения для токов, а затем и для синхронизирующих моментов в этом режиме работы.

При $v = 1$ из уравнений (14.2) имеем:

$$\left. \begin{aligned} [r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{d_2} + [x_c(j) - \\ - x_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{q_2} &= -j\dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}; \\ -[x_c(j) + x_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{d_2} + \\ + [r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{q_2} &= \dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (14.10)$$

Решая эти уравнения относительно токов $\dot{I}_{d_2}$, $\dot{I}_{q_2}$, получим:

$$\dot{I}_{q_2} = j\dot{I}_{d_2} = \frac{\dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}}{r + j2x_c(j)}. \quad (14.11)$$

Для определения синхронизирующего момента приемника подставим эти выражения в формулу момента (14.4):

$$M_2 = -\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[j \dot{E}_\Phi \dot{I}_{q_2}^* \left(\cos \frac{\theta}{2} - j \sin \frac{\theta}{2} \right) - j 2x_c(j) I_{q_2}^2 \right],$$

так как

$$\begin{aligned} \dot{I}_{d_2} \dot{I}_{q_2}^* - \dot{I}_{d_2}^* \dot{I}_{q_2} &= -j 2 I_{q_2}^2; \\ \dot{I}_{d_2} \dot{I}_{q_2}^* + \dot{I}_{d_2}^* \dot{I}_{q_2} &= 0; \quad I_{d_2}^2 = I_{q_2}^2. \end{aligned}$$

Производя дальнейшие преобразования, найдем:

$$\begin{aligned} M_2 &= -\frac{3}{4} \frac{E_\Phi^2 \sin \theta}{|r + j 2x_c(j)|^2} \operatorname{Re} \left\{ \left(j + \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) [r + j 2x_c(j)] - \right. \\ &\left. - 2j x_c(j) \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right\} = \frac{3}{4} \frac{E_\Phi^2 \sin \theta}{r'^2 + (x'_d + x'_q)^2} \left(x'_d + x'_q - r \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right), \quad (14.12) \end{aligned}$$

ибо

$$\begin{aligned} r + j 2x_c(j) &= r + j [x_d(j) + x_q(j)] = r + \tau_f r_f + \tau_k r_k + \\ &+ j (x'_d + x'_q) = r' + j (x'_d + x'_q), \end{aligned}$$

где

$$r' = r + \tau_f r_f + \tau_k r_k = r'_d + r'_q - r.$$

Для графического изображения синхронизирующего момента, как функции угла рассогласования, преобразуем несколько формулу (14.12).

Введя обозначения

$$\frac{x'_d + x'_q}{r} = \mu; \quad \frac{r'}{r} = \rho,$$

будем иметь

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{3}{4} \frac{E_\Phi^2}{r} \frac{\mu}{\mu^2 + \rho^2} \left(\sin \theta - \frac{2}{\mu} \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) = \\ &= \frac{3}{4} \frac{E_\Phi^2}{r} \frac{\mu}{\mu^2 + \rho^2} \left[\frac{\sqrt{\mu^2 + 1}}{\mu} \sin (\theta + \varphi) - \frac{1}{\mu} \right], \end{aligned}$$

где

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{1}{\mu}.$$

Таким образом, окончательно получаем

$$M_2 = \frac{3}{4} \frac{E_\Phi^2}{r} \frac{1}{\rho^2 + \mu^2} \left[\sqrt{\mu^2 + 1} \sin (\theta + \varphi) - 1 \right] \stackrel{1,02 \cdot 10^3}{=} \frac{1}{2\pi f} \text{ здм.} \quad (14.13)$$

Эта формула показывает, что синхронизирующий момент приемника при синхронной скорости вращения ($\nu = 1$) является синусоидальной функцией угла рассогласования при любых

параметрах селсина, которая может быть легко представлена графически (рис. 68).

Максимальное значение синхронизирующего момента будет при $\theta = \frac{\pi}{2} - \varphi$ равно

$$M_{2 \max} = \frac{3}{4} \frac{E_{\Phi}^2}{r} \frac{\sqrt{\mu^2 + 1} - 1}{\rho^2 + \mu^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} \frac{\text{гдм}}{\text{град}}. \quad (14.14)$$

По формулам (14.6) и (14.14) можно оценивать уменьшение максимального значения синхронизирующего момента при

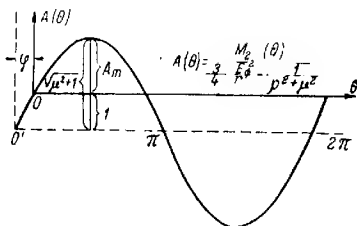


Рис. 68. Кривая синхронизирующего момента приемника при синхронной скорости вращения.

синхронной скорости по сравнению с режимом поворота. Так, например, для неявнополюсных селсинов с короткозамкнутой обмоткой в поперечной оси, параметры которых удовлетворяют соотношению

$$x'_d = x'_q; \quad r'_d = r'_q = 2r \quad \text{и} \quad x'_q = r'_q,$$

имеем

$$\rho = 3; \quad \mu = 4$$

и, следовательно,

$$\frac{(M_{2 \max})_{v=1}}{(M_{2 \max})_{v=0}} = \frac{\sqrt{17} - 1}{3^2 + 4^2} : \frac{1}{4} = 0,5.$$

Удельный момент, характеризующий точность следования селсина-приемника при синхронном вращении, определяется выражением:

$$m = \left(\frac{dM_2}{d\theta} \right)_{\theta=0} = \frac{3}{4} \frac{E_{\Phi}^2}{r} \frac{\sqrt{\mu^2 + 1}}{\rho^2 + \mu^2} \cos \varphi \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360f} \frac{\text{гдм}}{\text{град}},$$

или, так как

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}} = \frac{\mu}{\sqrt{\mu^2 + 1}},$$

$$m = \frac{3}{4} \frac{E_{\Phi}^2}{r} \cdot \frac{\mu}{\rho^2 + \mu^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360f} \frac{2d_m}{2\rho a_0}. \quad (14.15)$$

Эта формула позволяет оценить уменьшение удельного момента при переходе к синхронной скорости вращения. Так, для рассмотренного выше неявнополюсного селсина с электрическим демпфером получим

$$\frac{m_{v=1}}{m_{v=0}} = \frac{4}{3^2 + 4^2} : \frac{1}{4} = 0,64.$$

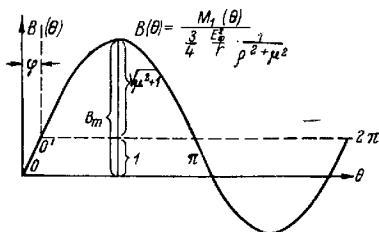


Рис. 69. Кривая синхронизирующего момента датчика при синхронной скорости вращения.

Совершенно аналогично тому, как это было сделано для приемника, можно вычислить синхронизирующий момент на датчике. Для этого надо выражения для токов (14.10), взятые с обратным знаком, подставить в формулу (11.5), заменив в ней δ на $-\frac{\theta}{2}$.

Сделав подстановку и выполняя точно такие же преобразования, как и при вычислении синхронизирующего момента приемника, получим:

$$M_1 = -\frac{3}{4} \frac{E_{\Phi}^2}{r} \frac{1}{\rho^2 + \mu^2} [\sqrt{\mu^2 + 1} \sin(\theta - \varphi) + 1] \frac{1,02 \cdot 10^3}{2\pi f} 2d_m. \quad (14.16)$$

Эта формула показывает, что синхронизирующий момент датчика представляет собой синусоиду (рис. 69).

Найдем выражения токов возбуждения датчика и приемника, а также фазных токов для этого предельного режима работы системы синхронной связи.

Имеем для тока $\dot{I}_d$ в продольном контуре селсина-приемника

$$\dot{I}_d = \dot{I}_{d_2} \cos \frac{\theta}{2} + \dot{I}_{q_2} \sin \frac{\theta}{2},$$

или, пользуясь формулой (14.11), получим

$$\begin{aligned} \dot{I}_d &= -\frac{j\dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}}{r + j2x_c(j)} \left(\cos \frac{\theta}{2} + j \sin \frac{\theta}{2} \right) = \\ &= -\frac{x_{af}\dot{U}_f \sin \frac{\theta}{2}}{Z_f(r + j2x_c(j))} e^{j\frac{\theta}{2}}. \end{aligned}$$

Отсюда для тока возбуждения приемника легко находим

$$\dot{I}_{f_2} = \frac{\dot{U}_f - j\frac{3}{2}x_{af}\dot{I}_d}{r_f + jx_f} = \frac{\dot{U}_f}{z_f} \left[1 + \frac{3}{2} \frac{jx_{af}^2}{z_f} \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{r + j2x_c(j)} e^{j\frac{\theta}{2}} \right]. \quad (14.17)$$

Совершенно аналогично для тока возбуждения датчика получим

$$\dot{I}_h = \frac{\dot{U}_f}{z_f} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{jx_{af}^2}{z_f} \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{r + j2x_c(j)} e^{-j\frac{\theta}{2}} \right]. \quad (14.17')$$

Обратимся к вычислению токов в фазах синхронизирующей обмотки. Из (14.8), полагая $\gamma = vt = t$, ($v = 1$), имеем

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \cos t \left(\dot{I}_{d_2} \cos \frac{\theta}{2} + \dot{I}_{q_2} \sin \frac{\theta}{2} \right) + \\ &+ \sin t \left(-\dot{I}_{d_2} \sin \frac{\theta}{2} + \dot{I}_{q_2} \cos \frac{\theta}{2} \right). \end{aligned}$$

Подставляя сюда выражения (14.11), получим

$$\dot{I}_A = \cos t \dot{I}_{d_2} e^{j\frac{\theta}{2}} + j \sin t \dot{I}_{d_2} e^{j\frac{\theta}{2}} = \dot{I}_{d_2} e^{j\frac{\theta}{2}} e^{jt}$$

Наличие множителя e^{jt} означает, что ток $\dot{I}_A$ имеет двойную частоту по отношению к частоте сети, поскольку в $\dot{I}_{d_2}$ содержится еще один множитель e^{jt} , который при символическом методе, обычно, опускается.

Последняя формула показывает, что эффективное значение тока в фазе синхронизирующей обмотки равно

$$I_A = I_{d_2} = \frac{E_\Phi \sin \frac{\theta}{2}}{[r + j2x_c(j)]}. \quad (14.18)$$

Токи в других двух фазах равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° .

Отсюда следует, что при синхронной скорости вращения токн в фазах синхронизирующей обмотки образуют вращающееся магнитное поле со скоростью, равной удвоенной синхронной скорости.

В. Режим вращения с малой скоростью $v \ll 1$

Обычно, индикаторные селсины в динамических режимах работают со скоростями вращения, не превышающими 500 об/мин. (для селсинов частотой 50 гц $v < \frac{1}{6}$). Это дает возможность произвести вычисление синхронизирующего момента приемника, пренебрегая в выражении для токов и момента селсна членами с v^2 , что значительно сокращает выкладки.

Из уравнений (14.2) получаем

$$i_{d_2} = \frac{-j\dot{E}_\Phi r v \sin \frac{\theta}{2}}{[r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta][r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta]}; \quad (14.19)$$

$$i_{q_2} = \frac{\dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2}}{r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta}.$$

Подставляя эти выражения для токов в формулу для синхронизирующего момента (14.4), будем иметь:

$$M_{\text{дин}} = M_{\text{ст}} + M', \quad (14.20)$$

где $M_{\text{ст}}$ — синхронизирующий момент приемника в режиме поворота;

$M_{\text{дин}}$ — синхронизирующий момент приемника в режиме вращения с малой скоростью;

M' — добавочное изменение момента, вызванное вращением селсинов.

$$\begin{aligned} M' &= -\frac{3}{2} Re \left[-j\dot{E}_\Phi i_{d_2}^* \sin \frac{\theta}{2} + x_c(j) (i_{d_2} i_{q_2}^* - i_{d_2}^* i_{q_2}) + \right. \\ &\quad \left. + x_u(j) \cos \theta \cdot (i_{d_2} i_{q_2}^* + i_{d_2}^* i_{q_2}) \right] = \\ &= -\frac{3}{2} \frac{E_\Phi^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}{|\Delta|^2} r v Re \{ [r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta][r + jx_c(j) - \\ &\quad - jx_u(j) \cos \theta] - jx_c(j)[r - jx_c(-j) - jx_u(-j) \cos \theta + r + \\ &\quad + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta] - jx_u(j) \cos \theta [-jx_c(-j) - \\ &\quad - jx_u(-j) \cos \theta - jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta] \}. \end{aligned}$$

Произведя вычисления, получим:

$$M' = -\frac{3}{2} \frac{E_{\Phi}^2 \sin \frac{\theta}{2}}{|\Delta|^2} r v [r^2 - |x_c(j) + x_u(j) \cos \theta|^2], \quad (14.21)$$

где

$$\Delta = [r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta] [r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta].$$

Пользуясь выражением для $M_{ст}$, выведенным в пункте А, формулу (14.21) запишем в виде

$$M' = M_{ст} \frac{r}{x'_q} v \frac{|x_c(j) + x_u(j) \cos \theta|^2 - r^2}{|r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta|^2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}.$$

Таким образом, окончательно получаем

$$M_{дин} = M_{ст} (1 + v h), \quad (14.22)$$

где

$$h = \frac{r}{x'_q} \frac{|x_c(j) + x_u(j) \cos \theta|^2 - r^2}{|r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta|^2} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2}.$$

Поскольку h для селсинов сравнительно небольшая величина, то можно практически считать, что в пределах до $v = 1/6$ динамический синхронизирующий момент селсина равен его значению в статическом режиме.

Что касается удельного момента селсина, то, как следует из формулы (14.22), он с точностью до v^2 не зависит от скорости вращения селсинов v .

§ 15. СИСТЕМА ПАРНОЙ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ ПРИ СДВИГЕ ФАЗЫ НАПРЯЖЕНИЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДАТЧИКА И ПРИЕМНИКА

Представляет интерес рассмотреть влияние уравнивающих токов на синхронизирующие моменты датчика и приемника, когда эти токи обусловлены различием э. д. с. синхронизирующих обмоток селсинов по фазе. Обычно в силу подобия параметров селсинов, различие в фазе э. д. с. синхронизирующих обмоток получается за счет сдвига фазы в напряжениях возбуждения датчика и приемника (например, при работе селсинов на длинных линиях, см. § 16).

Положим, что система парной синхронной связи состоит из датчика и приемника с одинаковыми параметрами, и напряжение возбуждения приемника опережает по фазе на некоторый угол ψ напряжение возбуждения датчика. Соответственно этому и э. д. с. синхронизирующей обмотки приемника опережает по фазе э. д. с. датчика также на угол ψ .

Первоначально рассмотрим эффект уравнивающих токов, исходя из простейшей векторной диаграммы для контуров d и q цепи, изображенной на рис. 70.

Обозначая индексом 1 величины, относящиеся к датчику, а индексом 2 — к приемнику, и считая угол рассогласования θ малым, получим векторную диаграмму токов и э. д. с., приведенную на рис. 71.

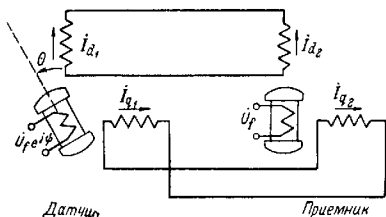


Рис. 70. Схема парной синхронной связи в осях d и q при наличии рассогласования и угла сдвига фазы напряжений возбуждения датчика и приемника.

Сделаем некоторые пояснения к векторной диаграмме. В согласованном положении датчика и приемника э. д. с. индуцируются только в продольных контурах d_1 и d_2 . На векторной диаграмме эти э. д. с. изображены в виде векторов $\dot{E}_{\phi_1}$ и $\dot{E}_{\phi_2}$, сдвинутых по фазе на угол ψ . Магнитные потоки селсинов в продольной оси ϕ_{d_1} и ϕ_{d_2} опережают соответствующие э. д. с. по фазе на 90° . Сумма векторов э. д. с. $\dot{E}_{\phi_1}$ и $\dot{E}_{\phi_2}$ образует э. д. с. $\Delta \dot{E}_d$ в продольном контуре, которая обуславливает появление уравнивающего тока $\dot{I}_{d_2}$ в продольном контуре приемника и равного ему тока $\dot{I}_{d_1}$ в продольном контуре датчика. Эти токи отстают по фазе от $\Delta \dot{E}_d$ на некоторый угол, зависящий от параметров селсина в продольной оси.

При рассогласовании датчика относительно приемника на некоторый малый угол θ уравнительные токи в продольном контуре селсинов практически не изменяются. В поперечном же контуре датчика появится э. д. с. $\Delta \dot{E}_q$, пропорциональная

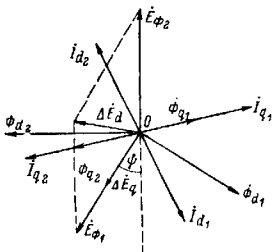


Рис. 71. Векторная диаграмма уравнительных токов датчика и приемника.

углу рассогласования θ и совпадающая по фазе с $\dot{E}_{\Phi_1}$. Под влиянием этой э. д. с. в поперечных контурах селсина возникают уравнивающие токи $\dot{I}_{q_2}$ в приемнике и равный ему $\dot{I}_{q_1}$ в датчике. Угол сдвига по фазе этих токов от $\Delta \dot{E}_q$ зависит от параметров селсина в поперечной оси.

При оценке величин моментов датчика и приемника будем исходить из формулы момента (см. § 5)

$$M = k [\Phi_d I_q \cos(\Phi_d \hat{I}_q) - \Phi_q I_d \cos(\Phi_q \hat{I}_d)].$$

Как следует из векторной диаграммы, выполненной для некоторых значений параметров селсина и угла сдвига фазы, вторые члены в формуле момента имеют одинаковые значения как для датчика, так и для приемника; первый же член для приемника значительно больше, чем для датчика, ибо угол между векторами $\dot{I}_{q_1}$ и $\dot{\Phi}_{d_1}$ значительно больше угла между векторами $\dot{I}_{q_2}$ и $\dot{\Phi}_{d_2}$. Оказывается, что можно так подобрать угол сдвига фазы, что момент на датчике станет равным нулю.

После этих предварительных замечаний перейдем к выводу формул для синхронизирующих моментов датчика и приемника. Для этого сначала составим уравнения э. д. с. При составлении уравнений э. д. с. целесообразно исходить из схемы, приведенной в § 14 (рис. 62), считая, что э. д. с. датчика отстает по фазе от э. д. с. приемника на угол ψ . Кроме того, оказывается более удобным угол сдвига фаз ψ , как и угол рассогласования θ , расположить, записав

$$\left. \begin{aligned} \text{для датчика } \dot{E}_{\Phi_1} &= \dot{E}_{\Phi} e^{-j\frac{\psi}{2}} \\ \text{для приемника } \dot{E}_{\Phi_2} &= \dot{E}_{\Phi} e^{j\frac{\psi}{2}} \end{aligned} \right\} \quad (15.1)$$

Тогда, составляя уравнения 2-го закона Кирхгофа для контуров d_0 , q_0 (см. рис. 62), совершенно аналогично тому, как это было выполнено при составлении уравнений (14.2), получим:

$$\left. \begin{aligned} [r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{d_0} + v[x_c(j) - x_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{q_0} &= \\ = j\dot{E}_{\Phi} \left(\cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} - v \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} \right) & \\ - v[x_c(j) + x_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{d_0} + [r + & \\ + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta] \dot{I}_{q_0} &= \\ = \dot{E}_{\Phi} \left(\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2} - v \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2} \right) & \end{aligned} \right\} \quad (15.2)$$

Решение этих уравнений относительно токов $\dot{I}_{d_0}$ и $\dot{I}_{q_0}$ при произвольной скорости вращения ω приводит к весьма сложным зависимостям, из которых практически трудно сделать какие-либо заключения. Поэтому ограничимся рассмотрением режима синхронного поворота $\omega = 0$ и примем, что

$$x_d(j) = x_q(j). \quad (15.3)$$

Можно показать [34], что это условие является необходимым для того, чтобы угол сдвига фаз ψ , при котором момент на датчике оказывается равным нулю, не зависел от угла рассогласования. Следует также заметить, что условие (15.3) достаточно хорошо выполняется у большинства селсинов, имеющих электрический демпферный контур в поперечной оси. Кроме того, даже если условие (15.3) не будет выполнено, то выведенные ниже формулы для удельных моментов останутся справедливыми, поскольку удельный момент селсинов определяется его параметрами в поперечной оси.

При принятых допущениях, решая уравнения (15.2), имеем:

$$\left. \begin{aligned} I_{d_0} &= \frac{j \dot{E}_\Phi \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\psi}{2}}{r + jx_q(j)} \\ I_{q_0} &= \frac{\dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\psi}{2}}{r + jx_q(j)} \end{aligned} \right\} \quad (15.4)$$

так как в силу соотношения (15.3)

$$x_c(j) = \frac{x_d(j) + x_q(j)}{2} = x_q(j); \quad x_u(j) = \frac{x_d(j) - x_q(j)}{2} = 0.$$

Для получения выражения синхронизирующего момента приемника воспользуемся формулой (14.4), заменив в ней $\dot{E}_\Phi$ на $\dot{E}_\Phi e^{j\frac{\psi}{2}}$ и полагая $x_c(j) = x_q(j)$ и $x_u(j) = 0$.

Получим

$$\begin{aligned} M_2 &= -\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ j E_\Phi^2 e^{j\frac{\psi}{2}} \frac{\left(\cos \frac{\psi}{2} + j \sin \frac{\psi}{2} \right) \sin \theta}{2 [r - jx_q(-j)]} + \right. \\ &+ \left. \frac{jx_q(j)}{2} \frac{E_\Phi^2 \sin \theta \cdot \sin \psi}{|r + jx_q(j)|^2} \right\} = \frac{3}{4} E_\Phi^2 \frac{\sin \theta}{r_q'^2 + x_q'^2} (x_q' \cos \psi + r \sin \psi). \end{aligned} \quad (15.5)$$

Аналогично вычисляется синхронизирующий момент датчика. Для этого в формуле (14.4) необходимо заменить $\dot{E}_\Phi$ на

$\dot{E}_\Phi e^{-j\frac{\psi}{2}}, \frac{\theta}{2}$ на $-\frac{\theta}{2}$ и подставить значения токов (15.4), взятые с обратным знаком. В результате найдем

$$M_1 = -\frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ -jE_\Phi^2 e^{-j\frac{\psi}{2}} \frac{\left(\cos \frac{\psi}{2} - j \sin \frac{\psi}{2} \right) \sin \theta}{2[r - jx_q(-j)]} + \right. \\ \left. + \frac{jx_q(j)}{2} \cdot \frac{E_\Phi^2 \sin \theta \cdot \sin \psi}{|r + jx_q(j)|^2} \right\} = \\ = -\frac{3}{4} E_\Phi^2 \frac{\sin \theta}{r_q^2 + x_q^2} (x_q' \cos \psi - r \sin \psi). \quad (15.6)$$

При сопоставлении выражений (15.5) и (15.6) видно, что, при наличии угла сдвига фаз между напряжениями возбуждения датчика и приемника, синхронизирующие моменты датчика и приемника не равны друг другу. А именно, если напряжение возбуждения датчика отстает по фазе от приемника, то момент на датчике падает, а на приемнике почти не меняется или даже возрастает.

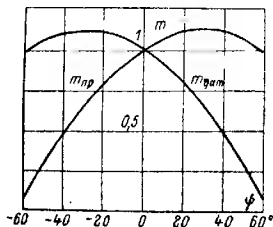


Рис. 72. Зависимость удельных моментов датчика и приемника от угла сдвига фаз напряжений возбуждения.

На рис. 72 приведены кривые зависимости удельных моментов датчика и приемника как функции угла сдвига фаз, построенные исходя из формул для удельных моментов:

$$\left. \begin{aligned} m_{\text{дат}} &= m_0 \left(\cos \psi - \frac{r}{x_q'} \sin \psi \right) \\ m_{\text{пр}} &= m_0 \left(\cos \psi + \frac{r}{x_q'} \sin \psi \right) \end{aligned} \right\}, \quad (15.7)$$

где m_0 — удельный момент при работе от однотипного датчика без сдвига фаз.

При построении было принято, что $x_q' = 2r$ и $m_0 = 1$. Угол ψ считается положительным, если напряжение возбуждения приемника опережает напряжение на датчике.

Как следует из формул (15.7), при угле сдвига фаз, выбран-

ном исходя из соотношения $\operatorname{tg} \psi = \frac{x'_q}{r}$, удельный момент на датчике становится равным нулю, в то время как удельный момент приемника

$$m_{\text{пр}} = 2m_0 \cos \psi$$

может даже несколько превосходить удельный момент m_0 при обычной парной работе селсинов.

При таком выборе угла сдвига фазы система синхронной связи имеет одностороннее действие. Это означает, что смещение датчика на некоторый угол θ вызывает появление синхронизирующего момента на приемнике и поворот его; однако, поворот приемника на некоторый угол не приводит к появлению момента на датчике и, следовательно, к его повороту. Подобного рода система синхронной связи может рассматриваться как своеобразный усилитель механического момента с достаточно большим коэффициентом усиления.

Такие свойства системы синхронной связи возникают за счет появления уравнивающих токов в цепи трехфазной обмотки селсинов. Оценим величину данных токов. С этой целью подставим выражения (15.4) в формулу (14.8), положив в них $\theta = 0$ (нет рассогласования), получим

$$j_A = - \frac{jE_\Phi \cos \gamma \sin \frac{\psi}{2}}{r + jx_d(j)}.$$

Аналогичные выражения можно найти для фаз B и C , заменив в них γ на $\gamma - \frac{2}{3}\pi$ и $\gamma + \frac{2}{3}\pi$.

Здесь целесообразнее писать в знаменателе $x_d(j)$, так как уравнивающие токи определяются параметрами селсина по продольной оси.

Переходя в последней формуле к действующим величинам, получим для максимального значения тока в фазе ($\gamma = 0$) выражение

$$I_{A_{\text{max}}} = \frac{E_\Phi}{z_d} \sin \frac{\psi}{2}. \quad (15.8)$$

Полученный результат может быть сформулирован следующим образом: максимальное значение уравнивающего тока в фазе синхронизирующей обмотки равно максимальному значению тока короткого замыкания фазы, умноженному на $\sin \frac{\psi}{2}$.

В тех случаях, когда датчик и приемник удалены друг от друга на значительное расстояние (несколько километров или даже десятков километров), на величины, характеризующие систему синхронной связи (например удельный момент), существенное влияние оказывают параметры линии связи. При этом необходимо учитывать влияние линии как в цепи синхронизации селсинов, так и в цепи питания обмотки возбуждения. В настоящем параграфе приводятся теория и расчетные формулы синхронных передач с длинными линиями, а также указываются методы их моделирования при экспериментальном исследовании. При изложении ограничимся рассмотрением только установившихся процессов.

А. Уравнения и эквивалентная схема длинной линии

Уравнения установившегося режима длинной двухпроводной линии, нагруженной на конце (рис. 73), имеют вид¹

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 z_0 \operatorname{sh} \gamma l \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{z_0} + \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l \end{aligned} \right\}, \quad (16.1)$$

где

$\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$ — напряжение и ток в начале линии;

$\dot{U}_2$ и $\dot{I}_2$ — напряжение и ток в конце линии;

z_0 — характеристическое (волновое) сопротивление линии;

γ — коэффициент распространения;

l — длина линии.

В селсиновых схемах преимущественно используются кабельные линии, для которых характеристическое сопротивление z_0 и коэффициент распространения γ подсчитываются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= \sqrt{\frac{r_0}{2j\omega C_0}} = \sqrt{\frac{r_0}{2\omega C_0}} e^{-j\frac{\pi}{4}} = \sqrt{\frac{r_0}{\omega C_0}} \frac{1-j}{2} \\ \gamma &= \sqrt{\frac{j r_0 \omega C_0}{2}} = \sqrt{r_0 \omega C_0} (1+j) \end{aligned} \right\}, \quad (16.2)$$

где

r_0 — сопротивление единицы длины одного провода линии;

C_0 — емкость единицы длины линии;

ω — угловая частота сети.

¹ П. Л. Калантаров, Л. Р. Нейман, Теоретические основы электротехники, ч. II Госэнергоиздат, 1948.

Из формул (16.1) при известной нагрузке в конце линии $\dot{z}_n = \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$ легко могут быть получены соотношения между напряжениями и токами в начале и конце линии:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \left(\operatorname{ch} \gamma l + \frac{\dot{z}_0}{\dot{z}_n} \operatorname{sh} \gamma l \right) \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_2 \left(\operatorname{ch} \gamma l + \frac{\dot{z}_n}{\dot{z}_0} \operatorname{sh} \gamma l \right) \end{aligned} \right\} \quad (16.3)$$

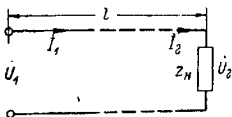


Рис. 73. Схема длинной двухпроводной линии, нагруженной на конце.

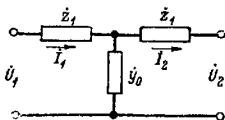


Рис. 74. Эквивалентный Т-образный четырехполюсник.

Деля первое равенство на второе, находим входное сопротивление линии, нагруженной на конце,

$$\dot{z}_{\text{вх}} = \dot{z}_0 \frac{\dot{z}_n \operatorname{ch} \gamma l + \dot{z}_0 \operatorname{sh} \gamma l}{\dot{z}_0 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{z}_n \operatorname{sh} \gamma l}. \quad (16.4)$$

Уравнениям длинной линии (16.1) соответствует эквивалентный Т-образный четырехполюсник (рис. 74), параметры которого определяются по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= \dot{z}_0 \frac{\operatorname{ch} \gamma l - 1}{\operatorname{sh} \gamma l}; \\ \dot{y}_0 &= \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\dot{z}_0}. \end{aligned} \right\} \quad (16.5)$$

Для трехпроводной симметричной линии эквивалентная схема линии имеет вид, изображенный на рис. 75. Указанных схем вполне достаточно для того, чтобы имитировать искусственную линию системы синхронной связи двух селсинов.

Для кабельных линий длиной до 10—20 км и частоты сети 50 Гц $\gamma l \ll 1$, поэтому формулы (16.5) могут быть значительно упрощены.

Получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}_1 &= r_0 l \\ \dot{y}_0 &= j\omega C_0 l \end{aligned} \right\} \quad (16.5')$$

Эквивалентная искусственная линия цепи синхронизации селсинов для этого случая показана на рис. 76, где

$$r_1 = \frac{r_0 l}{2}; \quad c_1 = c_0 l.$$

Из сказанного следует, что при низких частотах и сравнительно небольших длинах кабельной линии основное влияние

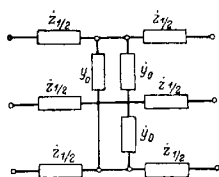


Рис. 75. Эквивалентная схема трехпроводной симметричной линии.

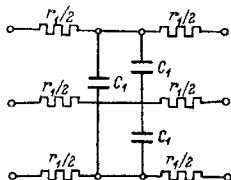


Рис. 76. Эквивалентная схема трехпроводной кабельной линии.

на работу системы синхронной связи оказывает активное сопротивление линии.

Б. Влияние линии в цепи синхронизации на величину удельного момента приемника

Рассматривая в § 13 систему синхронной связи при малых углах рассогласования, мы установили, что синхронизирующий момент приемника зависит от тока $\dot{I}_{q_2}$ в поперечной оси

$$M_2 = \frac{3}{2} \operatorname{Re} (j \dot{E}_\Phi^* \dot{I}_{q_2}).$$

Ток $\dot{I}_{q_2}$ был равен:

$$\dot{I}_{q_2} = \frac{\dot{E}_\Phi \sin \theta}{\dot{z}_{q_1} + \dot{z}_{q_2}}.$$

Это значение находилось из эквивалентной схемы поперечной оси системы синхронной связи, изображенной на рис. 77.

При включении длинной кабельной линии с параметрами r'_0 и C'_0 на единицу длины кабеля в цепь синхронизации эквивалентная схема системы синхронной связи изменится — в нее добавится сопротивление линии (рис. 78). Легко видеть, что за параметры линии (рис. 78) должны быть приняты значения $r'_0 = r_0$, $C'_0 = 2C_0$; последняя формула вытекает из преобразования межпроводниковых емкостей трехпроводной линии из треугольника в „звезду“ (рис. 79). Таким образом линия в поперечной оси селсинов должна иметь параметры:

$$\dot{z}'_0 = \sqrt{\frac{r'_0}{2j\omega C'_0}} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{r_0}{j\omega C_0}} = \frac{1}{2} \dot{z}_0;$$

$$\gamma' = \sqrt{\frac{r'_0 j\omega C'_0}{2}} = \sqrt{j r_0 \omega C_0} = \gamma.$$

Найдем выражения для поперечного тока и синхронизирующего момента в схеме с длинной линией (рис. 78).

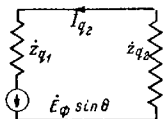


Рис. 77. Эквивалентная электрическая схема парной синхронной связи для оси q без линии.

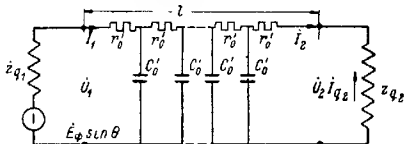


Рис. 78. Эквивалентная электрическая схема парной синхронной связи для оси q с длинной линией.

Из формулы (16.3), положив в ней $\dot{z}_n = z_{q2}$, имеем:

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{I}_1}{\operatorname{ch} \gamma l + \frac{\dot{z}_{q2}}{\dot{z}_0} \operatorname{sh} \gamma l}, \quad (16.6)$$

где $\dot{I}_1$ — ток в начале линии у датчика;

$$\dot{I}_1 = - \frac{\dot{E}_\phi \sin \theta}{\dot{z}_{q1} + \dot{z}_{\text{вх}}},$$

где $\dot{z}_{\text{вх}}$ — входное сопротивление линии, определяемое выражением (16.4) после замены в нем $\dot{z}_n = z_{q2}$.

Подставляя значение тока $\dot{I}_1$ в формулу (16.6) и выполняя элементарные преобразования, получим

$$\dot{I}_2 = \frac{-\dot{E}_\phi \sin \theta}{(\dot{z}_{q1} + \dot{z}_{q2}) \operatorname{ch} \gamma l + \dot{z}_0' \left(1 + \frac{\dot{z}_{q1} \dot{z}_{q2}}{\dot{z}_0'^2} \right) \operatorname{sh} \gamma l}$$

и, соответственно, для синхронизирующего момента приемника, при условии, что $\dot{I}_{q2} = -\dot{I}_2$,

$$\begin{aligned} M_2 &= \frac{3}{2} \operatorname{Re}(-j \dot{E}_\phi^* \dot{I}_2) = \\ &= \frac{3}{2} E_\phi^2 \sin \theta \operatorname{Re} \frac{j}{(\dot{z}_{q1} + \dot{z}_{q2}) \operatorname{ch} \gamma l + \dot{z}_0' \left(1 + \frac{\dot{z}_{q1} \dot{z}_{q2}}{\dot{z}_0'^2} \right) \operatorname{sh} \gamma l}. \end{aligned} \quad (16.7)$$

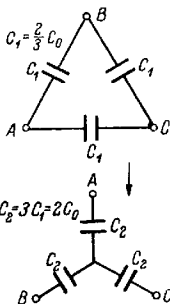


Рис. 79. Преобразование емкостей трехпроводной линии из треугольника в «звезду».

Для кабельных линий сравнительно небольших длин и низких частот, как и выше, можем принять $\operatorname{sh} \gamma' l = 1$; $\dot{z}'_0 \operatorname{sh} \gamma' l = \dot{z}_0 \gamma' l = r_1$, где r_1 — сопротивление одного провода линии; тогда

$$M_2 = \frac{3}{2} E_\phi^2 \sin \theta \operatorname{Re} \frac{j}{\dot{z}_{q_1} + \dot{z}_{q_2} + r_1 \left(1 + \frac{\dot{z}_{q_1} \dot{z}_{q_2}}{\dot{z}_0'^2} \right)}. \quad (16.7')$$

Из последней формулы следует, что при параметрах селсинов $\dot{z}_{q_1}$ и $\dot{z}_{q_2}$, значительно меньших характеристического сопротивления линии $\dot{z}'_0$, с ростом активного сопротивления линии r_1 синхронизирующий момент селсина быстро падает. Однако если параметры селсинов выбраны таким образом, что

$$\frac{\dot{z}_{q_1} \dot{z}_{q_2}}{\dot{z}_0'^2} = -1, \quad (16.8)$$

то синхронизирующий момент приемника в широких пределах (пока справедлива формула (16.7')) не зависит от длины линии.

Такое явление объясняется резонансом синхронизирующей обмотки с емкостью кабельной линии.

Следует заметить, что условие (16.8) может быть сравнительно легко выполнено. Действительно, волновое сопротивление кабеля $\dot{z}'_0$ выражается формулой (16.2):

$$\dot{z}'_0 = \frac{\dot{z}'_0}{\sqrt{2}} (1 - j).$$

Параметры же обмоток синхронизации селсинов обычно удовлетворяют соотношениям $r'_{q_1} = x'_{q_1}$; $r'_{q_2} = x'_{q_2}$. Поэтому

$$\dot{z}_{q_1} = \frac{z_{q_1}}{\sqrt{2}} (1 + j); \quad \dot{z}_{q_2} = \frac{z_{q_2}}{\sqrt{2}} (1 + j)$$

и, следовательно,

$$\frac{\dot{z}_{q_1} \dot{z}_{q_2}}{\dot{z}_0'^2} = \frac{z_{q_1} z_{q_2}}{z_0'^2} \frac{(1 + j)^2}{(1 - j)^2} = - \frac{z_{q_1} z_{q_2}}{z_0'^2}.$$

Отсюда, если

$$z_{q_1} z_{q_2} = z_0'^2, \quad (16.8')$$

то условие (16.8) выполнимо.

Поскольку для кабельных линий низких частот характеристическое сопротивление бывает в несколько сот и даже тысяч *ом*, то для получения соотношения (16.8') необходимо

синхронизирующие обмотки селсинов устраивать с большим z_q или применять специальные согласующиеся трансформаторы.

Кабельные линии, используемые для цепи синхронизации, должны быть отсимиетрированы, т. е. емкости между отдельными проводами кабеля сделаны одинаковыми.

Для коротких линий связи, имеющих большие значения характеристического сопротивления, влияние линии на величину удельного момента обычно учитывается при помощи увеличения активного сопротивления цепи синхронизации селсинов на величину активного сопротивления линии. Так, например, для схемы параллельной работы селсинов, представленной на рис. 59, получим

$$m = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \frac{nx'_{q1} + x'_{q2}}{[(r'_{q1} + r_{\text{лп}})n + r_{\text{лп}} + r'_{q2}]^2 + (nx'_{q1} + x'_{q2})^2} \times \\ \times \frac{1,02 \cdot 10^3}{360 \cdot f} \frac{\text{зДМ}}{\text{град}}, \quad (16.9)$$

где

$r_{\text{лп}}$ — сопротивление одного провода линии в цепи синхронизации датчика;

$r_{\text{лп}}$ — сопротивление одного провода линии в цепи синхронизации приемника.

В. Влияние линии в цепи возбуждения селсинов

Включение линии в цепь возбуждения селсинов вызывает два явления, с которыми надо считаться при проектировании системы синхронной связи:

- падение напряжения в активном сопротивлении линии;
- появление угла сдвига фазы между напряжениями возбуждения датчика и приемника.

На рис. 80 приведена векторная диаграмма для цепи возбуждения селсина, удаленного от источника питания. Как видно из диаграммы, напряжение возбуждения селсина U_f меньше напряжения сети U_c и опережает его по фазе на некоторый угол φ .

Для компенсации падения напряжения в линии у источника питания устраивают повышающие автотрансформаторы (рис. 81). Зная сопротивление линии $r_{\text{л}}$, величину и характер нагрузки, полную мощность P , потребляемую удаленными селсинами, и их $\cos \varphi$, можно легко определить необходимое напряжение U_1 повышающей обмотки автотрансформатора по формуле

$$U_1 = U_f \sqrt{1 + a(a + 2 \cos \varphi)}, \quad (16.10)$$

где

$$a = \frac{r_{\text{л}} P}{U_f^2}.$$

Угол сдвига фаз ψ , определяемый из векторной диаграммы (см. рис. 80), равен

$$\sin \psi = \frac{a \sin \varphi}{\sqrt{1 + a(a + 2 \cos \varphi)}}. \quad (16.11)$$

При этом напряжение возбуждения удаленного селсина опережает по фазе напряжение возбуждения селсина, находящегося у источника питания.

Учитывая формулы (15.7) предыдущего параграфа, можно заключить, что система синхронной связи при длинной линии

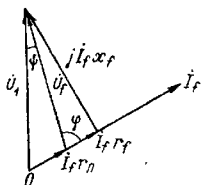


Рис. 80. Векторная диаграмма напряжений цепи возбуждения с длинной линией.

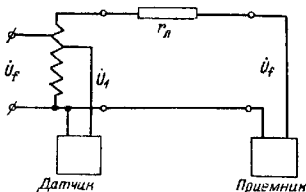


Рис. 81. Схема питания удаленного приемника через повышающий автотрансформатор.

в цепи возбуждения будет для удаленных приемников работать вполне удовлетворительно, так как в этом случае удельный момент не уменьшается с ростом угла сдвига фаз ψ (см. рис. 72).

Если же в системе синхронной связи удалены датчики, то удельный момент приемника резко падает с увеличением угла ψ , и, следовательно, должны быть приняты специальные меры для уменьшения угла сдвига фаз ψ такой системы синхронной связи.

Поскольку угол сдвига фаз ψ зависит от падения напряжения в линии, то необходимо добиться и уменьшения падения напряжения в линии.

Существует несколько способов уменьшения угла сдвига фаз ψ и падения напряжения:

1. Осуществление питания цепи возбуждения удаленных датчиков с помощью повышающих трансформаторов.

2. Подключение к удаленным датчикам параллельно цепи возбуждения емкости (это приведет к уменьшению намагничивающего тока и, следовательно, к уменьшению падения напряжения в линии).

3. Включение последовательно с целью возбуждения неудаленного приемника активного сопротивления, равного сопротивлению линии, с целью компенсации угла сдвига фазы ψ .

Каждый из указанных способов имеет свои преимущества и недостатки и выбор того или иного способа зависит от конкретных условий работы системы синхронной связи.

§ 17. СИСТЕМА ПАРНОЙ СИНХРОННОЙ СВЯЗИ ПРИ ОТСУТСТВИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НА ПРИЕМНИКЕ

Опыт показывает, что при обрыве цепи питания обмотки возбуждения явнополюсного приемника или неявнополюсного селсина-приемника с электрическим демпферным контуром

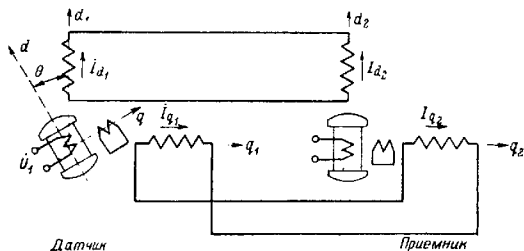


Рис. 82. Схема парной синхронной связи в осях d и q при отсутствии возбуждения на приемнике.

в поперечной оси, последний продолжает „следить“ за датчиком, т. е. в нем возникает синхронизирующий момент. Как уже указывалось в § 14, в этом случае синхронизирующий момент для явнополюсного селсина без демпферного контура должен быть реактивного происхождения.

Рассмотрим систему парной синхронной связи с селсинами одинаковых параметров при условии, что обмотка возбуждения приемника отключена от сети и разомкнута (рис. 82). Это значит, что обмотка d приемника имеет параметр x_d вместо $x_d(j)$ и значение э. д. с. $\dot{E}_{\Phi_2} = 0$. Кроме того, для упрощения вычислений будем считать, что система работает в режиме синхронного поворота ($v = 0$) с малым углом рассогласования. Работа системы в общем случае при любых углах рассогласования рассмотрена в [34].

Составим уравнения э. д. с. контуров d и q , считая угол θ малым. Имеем

$$\left. \begin{aligned} [2r + jx_d(j) - jx_d] \dot{I}_{d_2} - j[x_d(j) - x_q(j)] \sin \theta \dot{I}_{q_2} &= -\dot{E}_{\Phi} \\ -j[x_d(j) - x_q(j)] \sin \theta \dot{I}_{d_2} + [2r + j2x_q(j)] \dot{I}_{q_2} &= \dot{E}_{\Phi} \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (17.1)$$

Решая эти уравнения относительно токов $\dot{I}_{d_2}$ и $\dot{I}_{q_2}$ и пренебрегая членами с θ^2 , получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{d_2} &= \frac{-\dot{E}_\Phi}{2r + jx_d + jx_d(j)} \\ \dot{I}_{q_2} &= \frac{[2r + jx_d + jx_q(j)] \dot{E}_\Phi \sin \theta}{2[r + jx_q(j)][2r + jx_d + jx_d(j)]} \end{aligned} \right\} \quad (17.2)$$

Для вычисления синхронизирующего момента приемника подставим выражения для токов в формулу (9.18'), заменив в ней $x_d(j)$ на x_d и полагая $\dot{E}_\Phi = 0$:

$$M_2 = \frac{3}{4} E_\Phi^2 \sin \theta \operatorname{Re} \frac{[x_d - x_q(-j)][2r - jx_d - jx_q(-j)]}{[r - jx_q(-j)][2r + jx_d(j) + jx_d]}.$$

Выполняя вычисления, найдем

$$M_2 = \frac{3}{4} E_\Phi^2 \frac{(x_d - x'_q)(r_q'^2 + r^2 + x_q'^2 + x_d j x_q') - x_d(r'_q - r)}{[(r'_d + r)^2 + (x'_d + x_d)^2][r_q'^2 + x_q'^2]} \sin \theta. \quad (17.3)$$

Соответственно этому удельный момент селсина-приемника будет равен

$$m = \frac{3}{4} E_\Phi^2 \frac{(x_d - x'_q)(r_q'^2 + r^2 + x_q'^2 + x_d j x_q') - x_d(r'_q - r)}{[(r'_d + r)^2 + (x'_d + x_d)^2][r_q'^2 + x_q'^2]} \times \\ \times \frac{1,02 \cdot 10^3}{360f} \cdot \frac{2\partial m}{\partial \alpha d}. \quad (17.4)$$

Формула (17.3) показывает, что при отсутствии электрического демпферного контура в поперечной оси, когда $r'_q = r$ и $x'_q = x_q$, синхронизирующий момент приемника становится чисто реактивным в том смысле, что он пропорционален разности $x_d - x_q$. Естественно, что такой момент может быть только у явнополюсных селсинов. Сказанное полностью соответствует физической картине явлений в селсине-приемнике. Ротор приемника стремится занять такое положение, чтобы его ось d , имеющая наибольшую магнитную проводимость λ_d , совпала с направлением пульсирующего магнитного поля, создаваемого трехфазной обмоткой статора. Величина момента, стремящегося повернуть ротор, пропорциональна разности $\lambda_d - \lambda_q$, или, что то же, $x_d - x_q$. Заметим, что, как это следует из приведенных выше формул, момент, пропорциональный $x_d - x'_q$, может существовать и у неявнополюсных селсинов с демпферным контуром в поперечной оси.

§ 18. РАБОТА СЕЛСИНА-ПРИЕМНИКА ОТ МОЩНОГО ДАТЧИКА

Теоретический анализ системы синхронной связи, у которой датчик и приемник имеют разные параметры, приводит к достаточно сложным выражениям для синхронизирующих моментов. Из этих выражений почти невозможно установить зависимость синхронизирующего момента от параметров селсина для любых углов рассогласования. Для малых углов рассогласования такая зависимость была получена в § 12.

Представляется возможным сравнительно просто рассмотреть систему синхронной связи с бесконечно мощным датчиком.

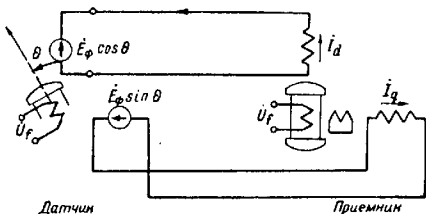


Рис. 83. Схема работы селсина-приемника от мощного датчика.

У такого датчика параметры равны нулю, что приводит к значительному упрощению выкладок и позволяет получить результат в конечном виде, т. е. выразить синхронизирующий момент как функцию параметров селсина-приемника.

Рассмотрение этого случая имеет важное практическое значение, так как позволяет установить причины второго устойчивого положения, которое имеет место у некоторых типов селсинов при работе их от мощных датчиков.

После этих предварительных замечаний перейдем к анализу системы, электрическая схема которой показана на рис. 83.

При составлении уравнений э. д. с. принимаем:

а) параметры датчика равны нулю;

б) в согласованном положении уравнительные токи в цепи синхронизации отсутствуют (что означает, что вторичные э. д. с. равны по величине и фазе);

в) $v = 0$ — режим поворота.

Получим:

$$\left. \begin{aligned} [r + jx_d(j)] i_d &= \dot{E}_\phi (1 - \cos \theta) \\ [r + jx_q(j)] i_q &= \dot{E}_\phi \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (18.1)$$

Решая уравнения (18.1) относительно токов и подставляя в формулу для синхронизирующего момента приемника (9.18'), будем иметь

$$M_2 = -\frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \operatorname{Re} \left\{ [x_d(j) - x_q(-j)] \frac{\sin \theta (1 - \cos \theta)}{[r + jx_d(j)][r - jx_q(-j)]} + \frac{j \sin \theta}{r - jx_q(-j)} \right\} = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \left[(A - B) \sin \theta + \frac{B}{2} \sin 2\theta \right], \quad (18.2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= \operatorname{Re} \left(\frac{-j}{r - jx_q(-j)} \right) = \frac{x_q'}{r_q'^2 + x_q'^2}; \\ B &= \operatorname{Re} \frac{x_d(j) - x_q(-j)}{[r + jx_d(j)][r - jx_q(-j)]} = \\ &= \frac{x_q'(x_d'^2 + r_d'^2 - 2r_d r) - (r_q'^2 + x_q'^2 - 2r_q' r)x_d'}{(r_d'^2 + x_d'^2)(r_q'^2 + x_q'^2)} \end{aligned} \right\}. \quad (18.3)$$

Выражение (18.2) показывает, что синхронизирующий момент приемника при работе его от мощного датчика можно рассматривать как сумму двух моментов $M'(\theta)$ и $M''(\theta)$, имеющих синусональные зависимости от угла рассогласования, (рис. 84)

$$M(\theta) = M'(\theta) + M''(\theta);$$

$$M'(\theta) = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 (A - B) \sin \theta;$$

$$M''(\theta) = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \frac{B}{2} \sin 2\theta.$$

В зависимости от соотношения между величинами A и B результирующая кривая синхронизирующего момента может иметь различный вид (рис. 85).

Кривая 1 (синусоида) соответствует значению $B = 0$.

Кривая 2 соответствует значению $B < 0$.

Кривая 3 бывает, когда $B > 0$, но $A - B > B$.

Кривая 4 имеет место, когда $B > 0$, но $A - B < B$.

Последний случай представляет некоторый интерес, так как говорит о возможности появления у селсина-приемника при работе его от мощного датчика второго устойчивого положения при угле рассогласования $\theta = 180^\circ$. Как следует из приведенных формул, второе устойчивое положение имеет место, если $A - B < B$ или $\frac{B}{A} > \frac{1}{2}$, при $B > 0$. Подставляя сюда выражения (18.3), получаем следующее условие наличия второго устойчивого положения:

$$H = \frac{2r_d' r + \frac{x_d'}{x_q} (r_q'^2 + x_q'^2 - 2r_q' r)}{r_d'^2 + x_d'^2} < \frac{1}{2}. \quad (18.4)$$

Поскольку наличие второго устойчивого положения селсина-приемника представляет собой весьма нежелательное явление, то при проектировании и расчете селсинов надо так выбирать их параметры, чтобы значение безразмерной величины H , определяемой формулой (18.4), было больше $1/2$.

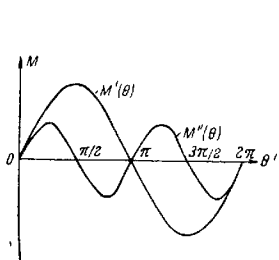


Рис. 84. Кривые зависимости моментов $M'(\theta)$ и $M''(\theta)$ от угла рассогласования.

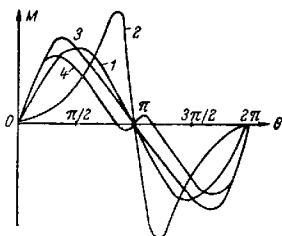


Рис. 85. Кривые синхронизирующих моментов при различных соотношениях параметров: 1) $B=0$; 2) $B < 0$; 3) $B > 0$; $A-B > B$; 4) $B > 0$ и $A-B < B$.

Это особенно относится к бесконтактным селсинам, имеющим большие значения x'_d .

Заметим, что значение $H=1$ соответствует синусоидальной кривой синхронизирующего момента.

§ 19. СИСТЕМА СИНХРОННОЙ СВЯЗИ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ДИФФЕРЕНЦИАЛОМ

Рассмотрим одну из наиболее сложных с точки зрения анализа систем синхронной связи — систему синхронной связи с электрическим дифференциалом. Будем считать, что трехфазные обмотки электрического дифференциала приведены к двум эквивалентным обмоткам на статоре и роторе d_s, q_s и d_r, q_r , подобно тому, как это было выполнено для трехфазной синхронизирующей обмотки селсина. Тогда электрическая схема системы синхронной связи с электрическим дифференциалом (ЭД) может быть представлена в виде, приведенном на рис. 86.

Теоретическому анализу подобная система синхронной связи подвергалась в работах Л. Н. Грузова и Г. И. Штурмана [13], [31].

В настоящем параграфе будут даны сравнительно простые и легко анализируемые выражения для удельных моментов

рассматриваемой системы, когда параметры ротора и статора ЭД одинаковы, а датчики одиотипны.

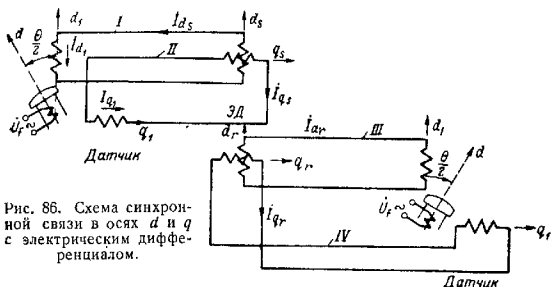


Рис. 86. Схема синхронной связи в осях d и q с электрическим дифференциалом.

А. Уравнения э.д.с. системы

При составлении уравнений э.д.с. системы будем исходить из приведенной выше схемы (см. рис. 86). В этой схеме угол рассогласования θ осуществлен путем отклонения датчиков на половинные углы $\frac{\theta}{2}$ от согласованного положения. Такой выбор угла рассогласования отвечает симметрии схемы и упрощает систему получающихся уравнений.

Пользуясь формулами (11.1) и (11.3), для контуров I , II , III , IV составляем уравнения 2-го закона Кирхгофа в режиме поворота ($\psi = 0$):

$$\left. \begin{aligned} [r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta + r_1 + jx_1] \dot{I}_{ds} + jx_m \dot{I}_{dr} - \\ - jx_u(j) \sin \theta \dot{I}_{qs} = - \dot{E}_\Phi \cos \frac{\theta}{2} \\ jx_m \dot{I}_d + [r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta + r_1 + jx_1] \dot{I}_{dr} + \\ + jx_u(j) \sin \theta \dot{I}_{qr} = - \dot{E}_\Phi \cos \frac{\theta}{2} \\ jx_u(j) \sin \theta \dot{I}_{dr} + \\ + [r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta + r_1 + jx_1] \dot{I}_{qr} + \\ + jx_m \dot{I}_{qs} = - \dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2} \\ - jx_u(j) \sin \theta \dot{I}_{ds} + jx_m \dot{I}_{qr} + \\ + [r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta + r_1 + jx_1] \dot{I}_{qs} = \dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \right\}, \quad (19.1)$$

где

r_1 — активное сопротивление фазы статора (ротора) электрического дифференциала (ЭД);

x_1 — полное индуктивное сопротивление статора (ротора) ЭД ($x_1 = x_m + x_s$);

x_m — индуктивное сопротивление взаимной индукции фаз статора и ротора ЭД при совпадении их осей;

$r, x_c(j)$ и $x_u(j)$ — параметры селсинов, определяемые по формулам (11.3).

Для сокращения записи временно введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} r + jx_c(j) + jx_u(j) \cos \theta + r_1 + jx_1 &= a_1 \\ r + jx_c(j) - jx_u(j) \cos \theta + r_1 + jx_1 &= a_2 \\ jx_m &= \beta \\ jx_u(j) \sin \theta &= b \\ -\dot{E}_\Phi \cos \frac{\theta}{2} &= e_1 \\ -\dot{E}_\Phi \sin \frac{\theta}{2} &= e_2 \end{aligned} \right\} \quad (19.2)$$

Тогда уравнения (19.1) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} a_1 \dot{I}_{d_s} + \beta \dot{I}_{d_r} - b \dot{I}_{q_s} &= e_1 \\ \beta \dot{I}_{d_s} + a_1 \dot{I}_{d_r} + b \dot{I}_{q_r} &= e_1 \\ b \dot{I}_{d_r} + a_2 \dot{I}_{q_r} + \beta \dot{I}_{q_s} &= e_2 \\ b \dot{I}_{d_s} + \beta \dot{I}_{q_r} + a_2 \dot{I}_{q_s} &= -e_2 \end{aligned} \right\} \quad (19.3)$$

Легко заметить, что вид полученных уравнений (19.3) не меняется при замене $\dot{I}_{d_s}$ на $\dot{I}_{d_r}$ и $\dot{I}_{q_s}$ на $-\dot{I}_{q_r}$ и обратно.

Следовательно,

$$\dot{I}_{d_s} = \dot{I}_{d_r}; \quad \dot{I}_{q_r} = -\dot{I}_{q_s} \quad (19.4)$$

Этот результат также непосредственно можно получить и при рассмотрении схемы, изображенной на рис. 86.

При условии (19.4), решая уравнения (19.3), легко получаем выражения для токов:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{d_s} = \dot{I}_{d_r} &= \frac{(a_2 - \beta) e_1 - b e_2}{(a_1 + \beta)(a_2 - \beta) - b^2} \\ \dot{I}_{q_r} = -\dot{I}_{q_s} &= \frac{(a_2 - \beta) e_2 - b e_1}{(a_1 + \beta)(a_2 - \beta) - b^2} \end{aligned} \right\} \quad (19.5)$$

Б. Удельный момент электрического дифференциала

Синхронизирующий момент ЭД может быть получен на основании формулы (9.16), что для неявнополюсной машины, каким и является ЭД, приводит к выражению

$$M = \frac{3}{2} x_m \operatorname{Re} (I_{ds} I_{qr}^* - I_{qs} I_{dr}^*),$$

или, см. формулу (19.4),

$$M = 3x_m \operatorname{Re} (i_{ds} i_{qr}^*). \quad (19.6)$$

Удельный момент ЭД в синхронных ваттах на радиан выражается формулой

$$m = \left(\frac{dM}{d\theta} \right)_{\theta=0} = 3x_m \frac{d}{d\theta} \operatorname{Re} (i_{ds} i_{qr}^*)_{\theta=0}. \quad (19.7)$$

Введем еще одно обозначение:

$$\alpha_1 + \beta = A_1; \quad \alpha_2 - \beta = A_2. \quad (19.8)$$

Тогда на основании формул (19.5) будем иметь

$$i_{ds} i_{qr}^* = \frac{(A_1^* e_2^* - b^* e_1^*)(A_2 e_1 - b e_2)}{|A_1 A_2 - b^2|^2}.$$

Отсюда, пользуясь выражениями для e_1 и e_2 из (19.2), получим:

$$\operatorname{Re} (i_{ds} i_{qr}^*) = \frac{E_\Phi^2}{|A_1 A_2 - b^2|^2} \left[\sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} (\operatorname{Re} A_1^* A_2 - |b|^2) - \cos^2 \frac{\theta}{2} \operatorname{Re} (b^* A_2) - \sin^2 \frac{\theta}{2} \operatorname{Re} (A_1^* b) \right]$$

и

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\theta} \operatorname{Re} (i_{ds} i_{qr}^*) \Big|_{\theta=0} &= \frac{E_\Phi^2}{|A_1 A_2 - b^2|_{\theta=0}^2} \left[\frac{1}{2} \operatorname{Re} (A_1^* A_2)_{\theta=0} - \right. \\ &\quad \left. \frac{d}{d\theta} \operatorname{Re} (b^* A_2) \Big|_{\theta=0} \right] + \\ &+ \left[\frac{E_\Phi^2}{|A_1 A_2 - b^2|^4} \operatorname{Re} (b^* A_2) \cdot \frac{d}{d\theta} |A_1 A_2 - b^2|^2 \right]_{\theta=0}. \quad (19.9) \end{aligned}$$

Но $|A_1 A_2 - b^2|^2$, в силу формул (19.8) и (19.2), зависит от угла рассогласования, как функция от $\cos \theta$ и $\sin^2 \theta$; поэтому последний член в выражении (19.9) обращается в нуль.

Действительно,

$$\frac{d}{d\theta} F(\cos \theta, \sin^2 \theta) \Big|_{\theta=0} = \left(-\frac{\partial F}{\partial \cos \theta} \sin \theta + \frac{\partial F}{\partial \sin^2 \theta} \sin 2\theta \right)_{\theta=0} = 0.$$

На основании выражений (19.2) и формул § 11 имеем:

$$|A_1 A_2 - b^2|_{\theta=0}^2 = [(r'_d + r_1)^2 + (x'_d + x_s + 2x_m)^2][(r'_q + r_1)^2 + (x'_q + x_s)^2];$$

$$Re(A_1^* A_2)_{\theta=0} = (r'_d + r_1)(r'_q + r_1) + (x'_d + x_s + 2x_m)(x'_q + x_s);$$

$$\frac{d}{d\theta} Re(b^* A_2)_{\theta=0} = \frac{1}{2}[(r'_d - r'_q)(r'_q + r_1) + (x'_d - x'_q)(x'_q + x_s)],$$

где r'_d, r'_q, x'_d, x'_q — параметры сенсоров-датчиков, определяемые формулами (10.6) и (10.11);

$x_s = x_1 - x_m$ — индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки ЭД.

Подставляя эти выражения в (19.9), а затем в (19.7), получим выражение удельного момента ЭД:

$$m = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 x_m \cdot \frac{(r'_q + r_1)^2 + (x'_q + x_s + 2x_m)(x'_q + x_s)}{[(r'_d + r_1)^2 + (x'_d + x_s + 2x_m)^2][(r'_q + r_1)^2 + (x'_q + x_s)^2]} \quad (19.10)$$

При переходе к $гдм/град$ в формулу (19.10) надо ввести численный множитель $\frac{1.02 \cdot 10^3}{360 f}$.

Для исследования влияния отдельных параметров системы на значение удельного момента ЭД, определяемого формулой (19.10), введем обозначения:

$$\frac{x'_q + x_s}{r'_q + r_1} = y; \quad \frac{x_m}{r'_q + r_1} = k. \quad (19.11)$$

Кроме того, при практических расчетах с достаточной точностью можно принять:

$$\frac{r'_d + r_1}{r'_q + r_1} \approx 1; \quad \frac{x'_d + x_s}{r'_q + r_1} \approx y.$$

Тогда формула (19.10) примет вид:

$$m = \frac{3}{8} \frac{E_{\Phi}^2}{r'_q + r_1} F(k, y), \quad (19.12)$$

где

$$F(k, y) = 4k \frac{1 + y(y + 2k)}{[1 + (y + 2k)^2](1 + y^2)}$$

некоторая безразмерная функция. График этой функции для различных значений k приведен на рис. 87.

Формула (19.12) позволяет быстро производить расчет удельного момента по параметрам системы при помощи

кривых $F(k, y)$. Кроме того, из нее можно сделать некоторые выводы, которыми следует руководствоваться при проектировании ЭД:

1. Активное сопротивление фаз ЭД следует уменьшать.
2. Электрический дифференциал целесообразно выполнять с меньшим воздушным зазором, что позволит разгрузить датчики от намагничивающего тока.

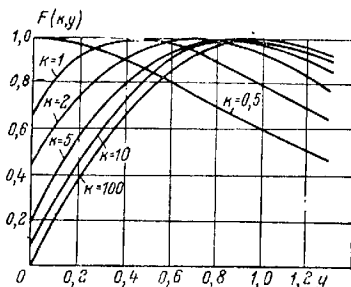


Рис. 87. График функции $F(k, y)$ для различных значений k .

3. Для данного значения k из кривых $F(k, y)$ (см. рис. 87) определяется оптимальное значение y , а следовательно, и рассеяние фазных обмоток ЭД и параметров датчика.

В. Удельный момент селсина-приемника

В некоторых случаях работы системы синхронной связи ЭД является датчиком, а один из селсинов — приемником. Поэтому представляет интерес получить выражение для удельного момента селсина-приемника, работающего от электрического дифференциала.

Для этого воспользуемся формулой синхронизирующего момента (14.4), заменив в ней токи I_d и I_q на $-I_{ds}$ и $-I_{qs}$.

Кроме того, с целью упрощения выкладок положим, что параметры селсина удовлетворяют условию

$$x_d(j) = x_q(j). \quad (19.13)$$

В результате, для синхронизирующего момента получим выражение:

$$M = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left[j \dot{E}_\Phi \left(I_{qs}^* \cos \frac{\theta}{2} + I_{ds}^* \sin \frac{\theta}{2} \right) + x_q(j) (I_{ds} I_{qs}^* - I_{ds}^* I_{qs}) \right]. \quad (19.14)$$

Подставляя сюда выражения для токов i_{ds} и i_{qs} по формулам (19.5) и производя преобразование подобно тому, как это было сделано в п. А, для удельного момента селсина-приемника получим выражение

$$m_{\text{пр}} = \frac{3}{8} \frac{E_{\Phi}^2}{r'_q + r_1} F_1(k, y), \quad (19.15)$$

где

$$F_1(k, y) = 4k \frac{y(y+2k) - 1 + 2\alpha'_k}{[1 + (y+2k)^2](1+y^2)}$$

и

$$\alpha'_k = \frac{r'_q - r}{r'_q + r}.$$

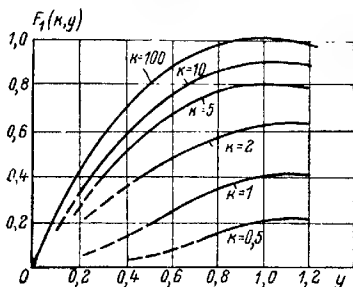


Рис. 88. График функции $F_1(k, y)$ для различных значений k .

Значения функции $F_1(k, y)$ для малого α_k при разных k приведены на рис. 88. Сравнивая формулы (19.15) и (19.12), легко установить, что удельный момент на датчике всегда меньше, чем на ЭД.

Из кривых, приведенных на рис. 88, следует, что для получения на селсине удельного момента, близкого по величине к удельному моменту ЭД, необходимо увеличивать значение k , т. е. уменьшать воздушный зазор ЭД.

Глава III

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДЕМПФИРОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ СЕЛСИНА-ПРИЕМНИКА ПРИ СОГЛАСОВАНИИ

§ 20. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В § 6 было показано, что селсин-приемник представляет собой колебательную систему, движение которой описывается дифференциальным уравнением (6.3). При этом характер затухания колебаний, как это видно из выражения (6.4), определяется коэффициентами демпферного и синхронизирующего моментов T_D и T_S . Поэтому теория электрического демпфирования селсинов при согласовании, кроме физической картины явления, должна дать выражения для демпферного и синхронизирующего моментов, как функции параметров селсина и, в частности, параметров электрического демпферного контура, расположенного на роторе в поперечной оси селсина.

Метод определения коэффициентов T_D и T_S основан на следующей простой идее. Положим, что ротор приемника совершает малые колебания около положения согласования с некоторой угловой частотой γ и амплитудой θ_m , тогда

$$\theta = \theta_m \sin \gamma t,$$

или в комплексной форме

$$\dot{\theta} = \dot{\theta}_m e^{j\gamma t}. \quad (20.1)$$

В этом случае электромагнитный момент, действующий на ротор селсина-приемника и равный, согласно (6.2),

$$M_e = -T_D \frac{d\theta}{dt} - T_S \theta,$$

также будет пульсировать с частотой γ и его значение в комплексной форме определяется формулой

$$\dot{M}_e = (-j\gamma T_D - T_S) \dot{\theta}. \quad (20.2)$$

Далее, составляя уравнения э. д. с. цепей селсина при малых колебаниях, находим токи, а затем и образуемый ими электромагнитный момент. Этот момент будет иметь частоту γ

и зависеть от параметров селсина и угла рассогласования θ . Сравнивая полученное выражение с (20.2), определяем иско-
мые коэффициенты T_D и T_S .

Следует отметить, что вывод выражения электромагнит-
ного момента в селсине через его параметры несколько за-
труднителен и требует разработки специальной методики
вычислений. Это обусловлено тем, что при колебаниях в цепи
синхронизации селсинов возникают токи двух частот. Дейст-
вительно, положим для простоты, что син-
хронизирующая обмотка селсина-прием-
ника состоит из двух взаимноперпендику-
лярных катушек (рис. 89), и продольная ось
ротора в положении согласования совпа-
дает с одной из них. Катушку, с кото-
рой совпадает в этом положении продоль-
ная ось, мы будем называть продольной
обмоткой d , вторая катушка тогда будет
представлять поперечную обмотку q .

Пусть $\Phi_d = \Phi_m \cos \omega t$ — поток обмотки
возбуждения ротора, пульсирующий с ча-
стотой сети ω . При малых колебаниях
ротора-приемника его потокосцепление
с обмоткой d не зависит от угла рассогла-
сования и изменяется с частотой сети. Создаваемая при этом
э. д. с. увеличивается э. д. с. датчика, и токи в продоль-
ной обмотке d не возникают, т. е. $i_d = 0$.

Потокосцепление поперечной обмотки определяется углом
рассогласования и при малых углах θ равно

$$\psi_q = \omega \Phi_m \cos \omega t \theta = \theta_m \omega \Phi_m \cos \omega t \sin \gamma t.$$

Соответственно этому э. д. с. в поперечной обмотке будет
равна

$$e_q = - \frac{d\psi_q}{dt} = \theta_m \omega \Phi_m \omega \sin \omega t \sin \gamma t - \theta_m \omega \Phi_m \gamma \cos \omega t \cdot \cos \gamma t$$

или

$$e_q = e_t + e_{np}. \quad (20.3)$$

Как видно из этого выражения, э. д. с. e_q состоит из
двух слагаемых: первое из них может быть названо трансфор-
маторной э. д. с., второе — э. д. с. вращения.

Производя элементарные тригонометрические преобразова-
ния, выражение (20.3) приведем к виду:

$$e_q = \frac{E_m}{2} [(1 - h) \cos (1 - h) \omega t - (1 + h) \cos (1 + h) \omega t], \quad (20.4)$$

где $E_m = \omega \Phi_m \omega \theta_m$ — максимальное значение трансформаторной
э. д. с. в обмотке q ;

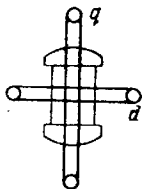


Рис. 89. Упрощенная
схема селсина в осях
 d и q .

$h = \frac{\nu}{\omega}$ — отношение угловой частоты механических колебаний роторов к угловой частоте сети; обычно $h \ll 1$.

Как видно из формулы (20.4), в контуре q действуют э. д. с. двух частот. Они в свою очередь вызовут появление токов также двух частот:

$$\omega_1 = (1 - h)\omega = \omega - \nu \quad \text{и} \quad \omega_2 = (1 + h)\omega = \omega + \nu.$$

Эти токи, взаимодействуя с основным потоком полюсов Φ_a , пульсирующим с частотой сети ω , создадут электромагнитные моменты, мгновенные значения которых будут пропорциональны выражениям типа

$$\cos \omega t \cdot \cos (\omega - \nu)t \quad \text{и} \quad \cos \omega t \cdot \cos (\omega + \nu)t.$$

Это означает, что моменты, создаваемые этими токами, можно разбить на моменты, изменяющиеся во времени с угловыми частотами 2ω и ν . На механические колебания ротора приемника с угловой частотой ν будут оказывать влияние только моменты частоты ν , а воздействие от моментов частоты 2ω при усреднении будет равно нулю.

Учитывая, что токи в обмотке сдвинуты по фазе от э. д. с. на некоторый угол, определяемый параметрами обмоток и частотами токов, можно утверждать, что непосредственное вычисление электромагнитного момента путем усреднения его мгновенных значений должно привести к весьма сложным выкладкам.

Вычисления значительно упрощаются, если воспользоваться символическим методом. Однако непосредственное применение символического метода путем замены оператора дифференцирования p на $j\omega$, как это было сделано в главе II, недопустимо в силу различия частот токов и магнитных потоков в селсине. Поэтому требуется разработка специальных правил использования символического метода для вычисления моментов в машинах, имеющих токи и потокосцепления различных частот. Эти правила применительно к малым колебаниям будут сформулированы в § 22.

В настоящей главе рассматривается теория электрического демпфирования колебаний при согласовании приемника при условии, что датчик неподвижен. Полученные выражения коэффициентов демпферного и синхронизирующего моментов могут быть использованы также для оценки колебаний при малых скоростях вращения ($\nu < 0,1$), в силу незначительного влияния э. д. с. вращения на синхронизирующий момент селсина (см. § 14).

В заключение параграфа сделаем пояснения относительно механизма электрического демпфирования селсина-приемника.

При колебаниях ротора селсина-приемника происходит индуктирование э. д. с. вращения в обмотке q приемника и соответственно токов в поперечной оси селсинов с частотами $\omega + \nu$ и $\omega - \nu$ (см. рис. 90). Это означает, что механическая энергия колебаний ротора селсина-приемника переходит в электромагнитную энергию поперечных контуров как приемника, так и датчика. Эта электромагнитная энергия расходуется на нагревание как самих контуров, так и трансформаторно связанных с ними демпферных контуров датчика и приемника. Следовательно, демпферные контуры датчика и приемника при

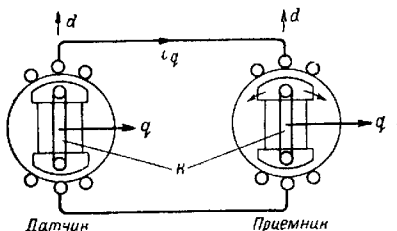


Рис. 90. Упрощенная схема синхронной передачи.

демпфировании колебаний приемника выполняют одинаковые функции. Поэтому необходимо, чтобы датчики также имели демпферные контуры в поперечной оси

§ 21. УРАВНЕНИЯ Э. Д. С. И МОМЕНТА ПРИ МАЛЫХ КОЛЕБАНИЯХ РОТОРА СЕЛСИНА-ПРИЕМНИКА

Как видно из предыдущего параграфа, уравнения э. д. с. при малых колебаниях в момент согласования системы парной синхронной связи следует составлять только для поперечной обмотки q , так как токи в продольном контуре d отсутствуют.

Положим, что датчик неподвижен, а селсин-приемник движется от положения согласования, имея малый угол рассогласования θ (рис. 91). Тогда уравнение э. д. с. для контура q в операторном выражении запишется в виде:

$$[r_1 + x_{q_1}(p)p] i_q + [r_2 + x_{q_2}(p)p] i_q = -e_\phi \theta + \psi_d p \theta, \quad (21.1)$$

где

$[r_1 + x_{q_1}(p)p] i_q$ и $[r_2 + x_{q_2}(p)p] i_q$ — соответственно, падения напряжений в контурах датчика и приемника;

$e_{\phi b}$ — трансформаторная э. д. с. в обмотке q приемника;
 $\psi_a \cdot p^b$ — э. д. с. вращения в той же обмотке;

p — оператор дифференцирования, который принимает значения в зависимости от частот тока i_q и угла рассогласования θ .

Между значениями e_{ϕ} и ψ_a , как нетрудно убедиться, существует соотношение $e_{\phi} = -p\psi_a$, которое при $i_a = 0$ совпадает с формулой (9.15).

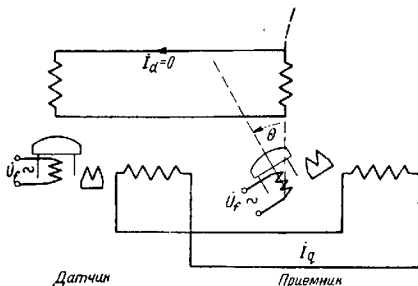


Рис. 91. Система парной синхронной связи при малом угле рассогласования.

Электромагнитный момент, действующий на ротор приемника, вычисляется по формуле (см. § 9)

$$M_s = -\frac{3}{2} \psi_a i_q. \quad (21.2)$$

В этой формуле не нужно брать вещественную часть, так как производится вычисление момента частоты колебаний ротора ψ , а не среднее значение момента, как это имело место в формуле (9.16).

Решая уравнение (21.1) относительно тока i_q и подставляя выражения для тока в формулу (21.2), можем получить выражение для электромагнитного момента, как функции угла рассогласования.

Однако, прежде чем производить указанные действия, необходимо установить правила замены оператора p в уравнении (21.1) в том случае, когда e_{ϕ} и ψ_a являются синусоидальными функциями частоты $\omega = 1$, а θ и p^b — синусоидальными функциями времени частоты колебаний ротора приемника при $h \ll 1$.

Кроме того, следует выяснить, как записать выражения для э.д.с. e_θ и $\psi_d p_\theta$, а также момента $\dot{\psi}_d \dot{I}_q$ в комплексной форме, имея в виду, что они представляют собой произведения величин разных частот.

§ 22. ПРАВИЛА ЗАМЕНЫ ОПЕРАТОРА p В УРАВНЕНИЯХ Э. Д. С. И ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО МОМЕНТА

Как уже указывалось, e_θ и ψ_d имеют частоту $\omega = 1$, а θ и p_θ частоту $h \ll 1$. Это означает, что частоты э.д.с., действующих в поперечном контуре q , будут равны сумме или разности указанных частот, т. е. $h + 1$ и $h - 1$. Такие же частоты будут иметь токи i_q в поперечных контурах датчика и приемника.

Отсюда следует, что в операторных сопротивлениях, входящих в левую часть уравнения (21.1), p заменяется на $j(h + 1)$ и $j(h - 1)$. Оператор p , относящийся к угловому смещению θ , заменяется на jh .

В этих правилах не учитывается то обстоятельство, что в правые части уравнений (21.1) и (21.2) входит произведение членов разных частот. Поэтому важно установить правила записи этих выражений в комплексной форме, чтобы получить токи и моменты нужной частоты. Так, например, для получения момента частоты h при токе частоты $(h + 1)$ необходимо брать величину, соответствующую разности частот, а при токе частоты $h - 1$ — величину, соответствующую сумме частот.

Укажем, как находить величины, соответствующие сумме или разности частот, если они заданы в комплексной форме через свои эффективные значения. Пусть две величины $a(t)$ и $b(t)$ имеют различные частоты и изменяются по синусоидальному закону:

$$a(t) = \sqrt{2}(A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \sin \omega_1 t);$$

$$b(t) = \sqrt{2}(B_1 \cos \omega_2 t + B_2 \sin \omega_2 t).$$

Их эффективные значения в комплексной форме соответственно равны:

$$\left. \begin{aligned} \dot{a} &= A_1 + jA_2 \\ \dot{b} &= B_1 + jB_2 \end{aligned} \right\}. \quad (22.1)$$

Найдем произведение этих величин:

$$\begin{aligned} a(t) \cdot b(t) &= 2(A_1 \cos \omega_1 t + A_2 \sin \omega_1 t)(B_1 \cos \omega_2 t + B_2 \sin \omega_2 t) = \\ &= (A_1 B_1 - A_2 B_2) \cos(\omega_1 + \omega_2)t + (A_2 B_1 + A_1 B_2) \sin(\omega_1 + \omega_2)t + \\ &+ (A_1 B_1 + A_2 B_2) \cos(\omega_1 - \omega_2)t + (A_2 B_1 - A_1 B_2) \sin(\omega_1 - \omega_2)t. \end{aligned}$$

Отсюда:

$\frac{1}{\sqrt{2}} [(A_1 B_1 - A_2 B_2) + j(A_2 B_1 + A_1 B_2)]$ — эффективное значение произведения частоты $(\omega_1 + \omega_2)$ в комплексной форме;

$\frac{1}{\sqrt{2}} [(A_1 B_1 + A_2 B_2) + j(A_2 B_1 - A_1 B_2)]$ — эффективное значение произведения частоты $(\omega_1 - \omega_2)$ в комплексной форме.

Первое из этих выражений получается из формулы (22. 1), как произведение $\frac{1}{\sqrt{2}} \dot{a} \dot{b}$, а второе выражение как произведение $\frac{1}{\sqrt{2}} \dot{a} \dot{b}^*$.

Это значит, что при вычислении момента от токов частоты $h+1$ в формуле (21. 2) для $\dot{\psi}_d$ надо взять сопряженное значение.

Точно также в уравнении (21.1) при вычислении токов частоты $(h-1)$, $\dot{E}_\Phi$ и $\dot{\psi}_d$ надо заменить их сопряженными значениями.

При нахождении момента от тока частоты $h-1$ и тока частоты $h+1$ сопряженные значения брать не надо.

Кроме того, поскольку при вычислении момента придется два раза находить комплексные выражения для произведений разных частот, то для получения момента и угла θ через одинаковые величины (например, через эффективные значения) необходимо ввести множитель $\frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2}$.

§ 23. РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ T_S И T_D СИНХРОНИЗИРУЮЩЕГО И ДЕМПФЕРНОГО МОМЕНТОВ

Учитывая сформулированные в § 22 правила, для токов частоты $h+1$ и $h-1$ из уравнения (21.1) имеем выражения:

$$\left. \begin{aligned} \dot{i}_{qh+1} &= \frac{-\dot{E}_\Phi \dot{\theta} + \dot{\psi}_d j h \dot{\theta}}{r_1 + j(h+1)x_{q1}(j(h+1)) + r_2 + j(h+1)x_{q2}(j(h+1))} \\ \dot{i}_{qh-1} &= \frac{-\dot{E}_\Phi^* \dot{\theta} + \dot{\psi}_d^* j h \dot{\theta}}{r_1 + j(h-1)x_{q1}(j(h-1)) + r_2 + j(h-1)x_{q2}(j(h-1))} \end{aligned} \right\} \quad (23.1)$$

Подставляя эти значения в формулу (21. 2) и имея в виду, что $\dot{E}_\Phi = -j\dot{\psi}_d$, получим электромагнитные моменты от токов частот $h+1$ и $h-1$:

$$\left. \begin{aligned} M_{h+1} &= \\ = -\frac{3}{4} E_\Phi^2 j \frac{h+1}{r_1 + r_2 + j(h+1)[x_{q1}(j(h+1)) + x_{q2}(j(h+1))]} \dot{\theta} \\ M_{h-1} &= \\ = -\frac{3}{4} E_\Phi^2 j \frac{h-1}{r_1 + r_2 + j(h-1)[x_{q1}(j(h-1)) + x_{q2}(j(h-1))]} \dot{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (23.2)$$

Результирующий электромагнитный момент, равный сумме этих моментов:

$$\dot{M}_s = \dot{M}_{h+1} + \dot{M}_{h-1}, \quad (23.3)$$

представляет собой, как указывалось выше (см. формулу 20.2), сумму синхронизирующего и демпферного моментов:

$$\dot{M}_s = -\dot{T}_s \theta - T_D j \dot{\theta}. \quad (23.4)$$

Сравнивая формулы (23.3) и (23.4), получим выражения для коэффициентов T_s и T_D

$$T_s + i h T_D = \frac{3}{4} E_{\Phi}^2 j \left\{ \frac{h+1}{r_1 + r_2 + j(h+1)[x_{q1}(j(h+1)) + x_{q2}(j(h+1))]} + \frac{h-1}{r_1 + r_2 + j(h-1)[x_{q1}(j(h-1)) + x_{q2}(j(h-1))]} \right\}. \quad (23.5)$$

В правой части последнего равенства преобразуем сумму в квадратных скобках, считая, что $h \ll 1$. Разложим выражения $x_{qn}(j(h \pm 1))$ ($n=1,2$) в ряд по степеням h , сохраняя в разложении члены с первой степенью h (в дальнейшем значок n для краткости будем опускать). На основании формулы (9.12)

$$x_q(p) = x_q - \frac{3}{2} \frac{x_{mk}^2 p}{r_k + x_{kp}},$$

отсюда

$$x'_q(p) = \frac{d}{dp} x_q(p) = -\frac{3}{2} x_{mk}^2 \frac{r_k}{(r_k + x_{kp})^2}$$

и, следовательно,

$$x_q(j(h+1)) = x_q(\pm j) + j h x'_q(\pm j); \quad (23.6)$$

причем

$$x'_q(\pm j) = r_0 \pm j x_0,$$

где

$$r_0 = \frac{3}{2} \frac{x_{mk}^2 r_k}{(r_k^2 + x_k^2)^2} (x_k^2 - r_k^2); \quad x_0 = 3 \frac{x_{mk}^2 r_k^2}{(r_k^2 + x_k^2)^3} x_k. \quad (23.7)$$

Подставляя выражения (23.6) в формулу (23.5) и используя соотношения, см. уравнения (10.10) — (10.11),

$$x_q(j) = x'_q - j \tau_k r_k; \quad r'_q = r + \tau_k r_k,$$

получим:

$$T_s + j h T_D = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \frac{x'_{q1} + x'_{q2} + j h (r_1 + r_2 + r_{01} + r_{02})}{(r'_{q1} + r'_{q2})^2 + (x'_{q1} + x'_{q2})^2 + j h a_0}, \quad (23.8)$$

где

$$a_0 = 2(r'_{q1} + r'_{q2})(x'_{q1} - x_{01} + x'_{q2} - x_{02}) + \\ + 2(x'_{q1} + x'_{q2})(r_{01} - \tau_{k1} r_{k1} + r_{02} - \tau_{k2} r_{k2}).$$

Освобождаясь в формуле (23.8) от мнимости в знаменателе и пренебрегая членами с h^2 , будем иметь

$$T_S + jhT_D = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \left\{ \frac{x'_{q1} + x'_{q2}}{(r'_{q1} + r'_{q2})^2 + (x'_{q1} + x'_{q2})^2} + \right. \\ \left. + jh \frac{1}{(r'_{q1} + r'_{q2})^2 + (x'_{q1} + x'_{q2})^2} \left[r_1 + r_2 + r_{01} + r_{02} - \frac{(x'_{q1} + x'_{q2}) a_0}{(r'_{q1} + r'_{q2})^2 + (x'_{q1} + x'_{q2})^2} \right] \right\}.$$

Произведя в квадратных скобках алгебраические преобразования и разделяя вещественные и мнимые части, окончательно получим:

$$T_S = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \frac{x'_{q1} + x'_{q2}}{(r'_{q1} + r'_{q2})^2 + (x'_{q1} + x'_{q2})^2}; \quad (23.9)$$

$$T_D = \frac{3}{2} E_{\Phi}^2 \left\{ \frac{(r_1 + r_2 + r_{01} + r_{02}) [(r'_{q1} + r'_{q2})^2 - (x'_{q1} + x'_{q2})^2]}{[(r'_{q1} + r'_{q2})^2 + (x'_{q1} + x'_{q2})^2]^2} + \right. \\ \left. + \frac{2(r'_{q1} + r'_{q2})(x'_{q1} + x'_{q2})(x_{01} + x_{02})}{[(r'_{q1} + r'_{q2})^2 + (x'_{q1} + x'_{q2})^2]^2} \right\}. \quad (23.10)$$

Формула (23.9), как и следовало ожидать, совпадает с полученным нами ранее выражением (12.2) для удельного момента селсина-приемника при парной работе.

Формула (23.10) показывает, что коэффициент демпферного момента T_D приемника зависит в равной степени как от параметров приемника, так и от параметров датчика. Это подтверждает сделанный ранее вывод, что для получения лучшего демпфирования приемников датчики также должны выполняться с электрическими демпферами в поперечной оси.

В том случае, когда датчик и приемник имеют равные значения параметров, формула для T_D имеет более простой вид. Выражая T_D в $гдм \cdot сек$, получим

$$T_D = \frac{3}{4} E_{\Phi}^2 \frac{(r + r_0) (r_q'^2 - x_q'^2) + 2r'_q x'_q x_0}{(r_q'^2 + x_q'^2)^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{(2\pi f)^2}, \quad (23.11)$$

где r_0 и x_0 — величины, зависящие от параметров демпферного контура и определяемые формулами (23.7).

Для селсинов, у которых демпферный контур отсутствует, параметры r_0 и x_0 равны нулю. У этих селсинов коэффициент

демпферного момента определяется соотношением между параметрами r и x_q :

$$T_D = \frac{3}{4} E_\Phi^2 \frac{r(r^2 - x_q^2)}{(r^2 + x_q^2)^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{(2\pi f)^2}. \quad (23.12)$$

Так, например, если $r > x_q$, то $T_D > 0$ и селсины не входят в незатухающие колебания. Если же $r < x_q$, то $T_D < 0$ и селсины могут впасть в незатухающие колебания; во избежа-

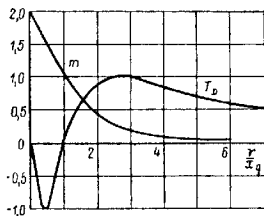


Рис. 92. Зависимость удельного и демпферного моментов от отношения $\frac{x_q}{r}$ при $r = \text{const.}$

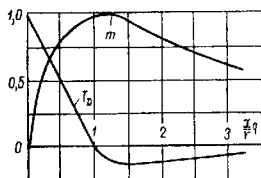


Рис. 93. Зависимость удельного и демпферного моментов от отношения $\frac{r}{x_q}$ при $x_q = \text{const.}$

ние этого их приходится снабжать механическими демпферными устройствами.

Рассмотрим, как изменяется демпферный момент селсина-приемника, выражаемый формулой (23.12), при изменении его параметров r и x_q .

Полагая, что E_Φ и r — постоянны, а изменяется только значение параметра x_q , получим кривую изменения коэффициента демпферного момента T_D , изображенную на рис. 92; коэффициент демпферного момента при $x_q = 0$ принят равным единице. Точно также, считая E_Φ и x_q постоянными, а r — переменным, построим кривую изменения $T_D = F(r)$ (рис. 93). При построении считаем, что $T_D = 1$, если $r = 2,45 x_q$ (это значение r соответствует максимуму демпферного момента).

На этих же рисунках приведены для сравнения кривые удельных моментов.

Из этих кривых следует, что условия получения максимальных значений демпферного и удельного синхронизирующего моментов не совпадают. Для получения максимума удельного момента необходимо, чтобы $x_q = r$. Однако демпферный момент при этом обращается в нуль.

Уменьшать же полюсную дугу так, чтобы r было значительно больше x_q , не представляется возможным в силу резкого уменьшения удельного момента.

Более удовлетворительное соотношение между значениями удельного синхронизирующего и демпферного моментов получается в селсинах с электрическим демпфером в поперечной оси. В этом случае, как видно из формулы (23.11), даже при $x'_q = r'_q$ (условие максимума удельного момента) демпферный момент остается положительным.

Обычно, с целью получения лучшего демпфирования, параметры селсинов с электрическим демпфером выбирают так, чтобы r'_q было несколько больше x'_q .

Укажем еще на одно важное обстоятельство, вытекающее из формулы (23.11). Демпферный момент, выраженный в *гдм·сек*, убывает обратно пропорционально квадрату частоты, в то время как удельный момент — пропорционально первой степени частоты. Это приводит к тому, что получение удовлетворительного электрического демпфирования на повышенных частотах сильно затрудняется.

§ 24. ВРЕМЯ ЗАТУХАНИЯ СЕЛСИНА-ПРИЕМНИКА ПРИ СОГЛАСОВАНИИ

Время затухания селсина-приемника при начальном рас-согласовании его на некоторый малый угол θ_0 может быть получено на основании решения уравнения движения ротора приемника с учетом действующих на него сил.

Имеем [см. уравнение (6.3)]

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + T_D \frac{d \theta}{dt} + T_S \theta = \pm M_T. \quad (24.1)$$

Разделив правую и левую части уравнения на I , получим:

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} + 2\lambda \frac{d \theta}{dt} + \nu_0 (\theta \pm B) = 0, \quad (24.2)$$

где

$B = \frac{M_T}{T_S}$ — зона нечувствительности, определяемая моментом сухого трения и удельным моментом;

$\lambda = \frac{T_D}{2I}$ — коэффициент затухания колебаний;

$\nu_0 = \sqrt{\frac{T_S}{I}}$ — угловая частота свободных колебаний.

Решение уравнения (24.2), которое приводится в курсах по теории колебаний,¹ имеет вид:

$$\theta_n = (\theta_0 - B)\delta^n - 2B \frac{\delta(1 - \delta^{n-1})}{1 - \delta} - B, \quad (24.3)$$

где

θ_0 — начальная амплитуда;

θ_n — амплитуда n -го полуколебания;

$\delta = e^{-\pi \frac{\lambda}{\nu}} < 1$ — декремент затухания;

$t_0 = \frac{\pi}{\nu} = \frac{\pi}{\sqrt{\nu_0^2 - \lambda^2}}$ — время одного полуколебания.

Пусть $0 < \theta_n < B$; это означает, что n -ое полуколебание было последним (сигнал попал в зону нечувствительности), тогда время затухания определится выражением

$$t_{\text{зат}} = n \cdot t_0. \quad (24.4)$$

Полагая $B \ll \theta_0$, уравнение (24.3) для последнего n -го полуколебания запишем в виде:

$$\theta_0 \delta^n (1 - \delta) - 2B(1 - \delta) - 2B(\delta - \delta^n) = 0,$$

откуда

$$\delta^n = \frac{1}{1 + \frac{\theta_0}{2B}(1 - \delta)}.$$

Логарифмируя обе части этого равенства при условии, что $\delta = e^{-\lambda t_0}$, получим

$$-n \lambda t_0 \lg e = -\lg \left[1 + \frac{\theta_0}{2B}(1 - \delta) \right]$$

или, пользуясь формулой (24.4), запишем равенство в окончательном виде:

$$t_{\text{зат}} = \frac{\lg \left[1 + \frac{\theta_0}{2B}(1 - \delta) \right]}{0,434 \lambda}. \quad (24.5)$$

Следует отметить, что полученная формула справедлива, если начальная амплитуда — величина малая. Однако при значительном затухании она может применяться и для оценки времени затухания с большими начальными углами рассогласования, так как при этом после двух-трех качаний колебания становятся малыми.

Отметим одну интересную особенность синхронной связи, являющуюся следствием нелинейности колебаний при согласовании (сухое трение.). Если $\lambda < 0$, то $\delta > 1$, как следует из

¹ Б. В. Булгаков, Колебания, Гостехиздат, т. I, 1949 г., стр. 325.

формулы (24.5), время затухания имеет конечное значение (затухающие колебания) при $\theta_0 < \frac{2B}{\delta-1}$ и обращается в бесконечность (незатухающие колебания) при $\theta_0 = \frac{2B}{\delta-1}$. Это проявляется в том, что при малых начальных амплитудах колебания затухают, в то время как при больших начальных амплитудах они становятся незатухающими.

$$\left. \begin{aligned} \theta_1 &= \theta_0 \delta - B(1 + \delta) \\ \theta_2 &= \theta_1 \delta - B(1 + \delta) \\ \theta_3 &= \theta_2 \delta - B(1 + \delta) \\ &\vdots \\ &\vdots \\ &\vdots \\ \theta_n &= \theta_{n-1} \delta - B(1 + \delta) \end{aligned} \right\} \quad (24.6)$$

$$\delta = \frac{\theta_1 - \theta_2}{\theta_0 - \theta_1} = \frac{\theta_2 - \theta_3}{\theta_1 - \theta_2} = \dots \quad (24.7)$$

Зная декремент затухания, нетрудно определить и коэффициент демпферного момента селсина-приемника T_D .

Тогда

$$T_D = \frac{2\sqrt{IT_S}}{\pi} (1 - \delta).$$

Если начальный угол рассогласования не превышает $20-30^\circ$, то с достаточной степенью точности можно считать, что величина амплитуды линейного напряжения пропорциональна углу рассогласования.

Формула (24.5) для времени затухания получена при учете сил сухого трения и может быть использована для приближенного определения времени затухания колебаний селсина-приемника с механическим демпфером.

В инерционно-фрикционном демпфере успокоение колебаний при малых углах осуществляется за счет сил сухого

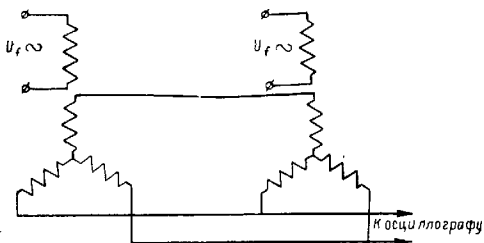


Рис. 94. Схема для записи колебаний ротора.

трения между диском, насаженным на вал селсина, и кольцевым маховиком, который при быстрых качаниях ротора приемника практически можно считать неподвижным. Положим, что электрическое демпфирование отсутствует, т. е. коэффициент затухания λ равен нулю, тогда декремент затухания $\delta=1$. Раскрывая неопределенность в формуле (24.4), получим

$$t_{\text{зат}} = \frac{\pi}{0,868} \cdot \frac{\theta_0}{B\gamma},$$

или, подставляя значения B и γ ,

$$t_{\text{зат}} = 3,6 \frac{\theta_0}{M_T} \sqrt{T_S I}. \quad (24.10)$$

Из формулы (24.10) следует, что для уменьшения времени затухания колебаний необходимо увеличивать трение между диском, сидящим на оси селсина, и маховиком демпфера. Однако увеличение трения не должно быть чрезмерным, так как при значительном трении маховик демпфера будет совершать колебания, составляя одно целое с ротором селсина. Из этих соображений момент трения целесообразно выбирать в не-

сколько раз меньше инерционного момента маховика демпфера, равного $\nu^2 \cdot \theta_0 \cdot I_D$.

Имеем

$$M_T = \frac{\nu^2 \theta_0 I_D}{n},$$

где n — отношение максимального инерционного момента демпфера к моменту трения.

Подставляя это выражение в формулу (24.10), получим:

$$t_{\text{зат}} = 3,6 \frac{I}{I_D} \cdot \frac{n}{\nu}. \quad (24.11)$$

Последняя формула позволяет по известной угловой частоте механических колебаний ротора селсина-приемника ν , моментам инерции ротора I и махового диска демпфера I_D , определить значение n , чтобы обеспечить заданное время затухания. Выбор величины I_D определяют, исходя из значения динамических ошибок селсина-приемника при синусоидальном движении (см. § 27).

Практически момент трения подбирают экспериментальным путем, исходя из требований наименьшего времени затухания колебаний ротора селсина-приемника после начального рас-
согласования на 180° .

Глава IV

ОШИБКИ ИНДИКАТОРНОЙ СИНХРОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

§ 25. ОБЩИЕ СООБРАЖЕНИЯ

Синхронизирующий момент селсна-приемника пропорционален углу рассогласования и в согласованном положении равен нулю. Поэтому наличие даже самого незначительного тормозного момента приводит к появлению некоторой ошибки приемника. Величина этой ошибки характеризует точность индикаторной синхронной передачи, т. е. точность, с которой ротор приемника следует за ротором датчика.

Обозначим $M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2)$ тормозной момент на валу приемника. В общем случае он зависит от угла поворота ротора приемника относительно некоторого фиксированного положения (шкалы) θ_2 и угловой скорости вращения ротора $\dot{\theta}_2$. Уравнение движения ротора приемника запишем в виде

$$I \frac{d^2 \theta_2}{dt^2} = M_s(\theta, \dot{\theta}, v) - M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2), \quad (25.1)$$

где I — момент инерции ротора приемника;

$M_s(\theta, \dot{\theta}, v)$ — электромагнитный момент, приложенный к ротору приемника и зависящий от угла рассогласования θ , его производной и скорости вращения v селсинов.

При небольших скоростях вращения (до 500 об/мин.) типичных для индикаторных синхронных передач, зависимостью M_s от скорости v можно пренебречь. Кроме того, ошибка (угол рассогласования), как правило, есть величина малая. Это позволяет записать выражения для $M_s(\theta, \dot{\theta})$ в виде

$$M_s = -T_s \theta - T_D \frac{d\theta}{dt} \quad (\text{см. § 23}),$$

где T_s и T_D — коэффициенты синхронизирующего и демпферного моментов.

Если θ выражается в градусах, то $T_s = m$ — удельный момент приемника.

Уравнение (25.1) является исходным при определении ошибок индикаторной синхронной передачи. При этом различают два типа ошибок: статические и динамические.

Ошибки, возникающие в индикаторной синхронной передаче в режиме поворота $\dot{\theta}_2 = 0$, называются статическими ошибками. Величина статической ошибки находится из соотношения

$$M_s(\theta) + M_T(\theta_2) = 0,$$

которое при малом угле рассогласования имеет вид

$$\theta^\circ = \frac{M_T(\theta_2)}{m}. \quad (25.2)$$

Основными факторами, обуславливающими статическую ошибку селсина-приемника, являются:

- а) момент трения в подшипниках и щетках (для контактных селсинов);
- б) неточность балансировки ротора и стрелки;
- в) реактивные моменты за счет неравномерности магнитной проницаемости стали статора;
- г) короткозамкнутые витки в трехфазной обмотке селсина и в пакете железа;
- д) реактивные моменты от зубчатого строения статора и ротора селсина;
- е) эллиптичность ротора, неравномерный воздушный зазор и прочие технологические погрешности.

Ошибки, возникающие в индикаторной синхронной передаче в режиме вращения с постоянной или переменной скоростью, называют динамическими ошибками. Значения этих ошибок зависят от удельного момента приемника, момента инерции ротора, способа демпфирования, режима вращения и других факторов.

Некоторое влияние на точность индикаторной синхронной передачи оказывают изменения напряжения и частоты в сети. Эти изменения сказываются, главным образом, на величине удельного момента приемника.

§ 26. СТАТИЧЕСКИЕ ОШИБКИ ИНДИКАТОРНОЙ СИНХРОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

Статические ошибки селсина-приемника определяются следующим образом. Датчик поворачивается в пределах одного оборота на равные углы по равномерной шкале вначале по часовой стрелке, а затем — против нее. Показания стрелки приемника отсчитываются по такой же шкале. Разность показаний датчика и приемника представляет собой статическую ошибку. Типичная кривая ошибок селсина-приемника приведена на рис. 95. Полусумма абсолютных значений максимальных ошибок обоих знаков называется „максимальной ошибкой“ селсина

$$\Delta\theta^\circ = \frac{(\Delta\theta_1^\circ) + (\Delta\theta_2^\circ)}{2}. \quad (26.1)$$

В зависимости от значения максимальной ошибки обычно устанавливают три класса точности селсинов (табл. 2).

Рассмотрим более подробно влияние перечисленных выше факторов на значение статической ошибки селсина.

Значение ошибки от трения в подшипниках и щетках зависит от отношения удельного момента селсина-приемника к моменту трения, называемому коэффициентом статической добротности селсина S

$$S = \frac{m}{M_{\tau}} \quad (26.2)$$

Таблица 2

Класс точности	Максимальная ошибка (не более), град.
1	0,75
2	1,5
3	2,5

Величина, обратная добротности, взятая с разными знаками,

$$\pm B = \pm \frac{1}{S} = \pm \frac{M_{\tau}}{m},$$

характеризует величину зоны нечувствительности приемника, в пределах которой ротор приемника может занять любое

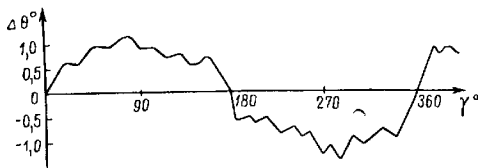


Рис. 95. Типичная кривая статических ошибок селсина-приемника.

положение при одном и том же положении датчика. Так как момент трения всегда направлен против направления вращения, то при установке датчика в одно и то же положение, подходя один раз слева, а другой раз справа, ротор приемника не будет доходить до синхронного положения и остановится первый раз левее, а второй раз правее этого положения. На рис. 96 представлены кривые ошибок селсина-приемника СС-404, обладающего статической добротностью не более $0,5 \frac{1}{\text{град}}$, а на рис. 97 — кривые ошибок бесконтактного селсина БС-404А, имеющего значительно большую статическую добротность.

Ошибки, обусловленные наличием трения на оси ротора приемника, характеризуются областью, заключенной между кривыми ошибок, снятыми при повороте ротора датчика по и против часовой стрелки.

Сравнивая кривые ошибок селсинов СС-404 и БС-404А, нетрудно видеть то громадное значение, которое имеет статическая добротность при оценке различных приемников. При большой статической добротности зона нечувствительности ничтожна и кривые ошибок для правого и левого вращений почти совпадают, как это имеет место у селсина БС-404А.

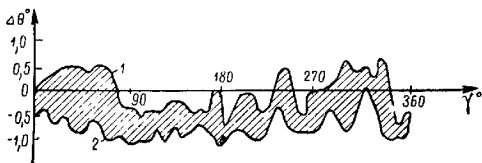


Рис. 96. Кривые статических ошибок контактного селсина-приемника СС-404.

Следует также указать, что при добротностях $0,5 \frac{1}{град}$ и ниже наблюдается медленное подползание стрелки селсинов-приемников после остановки оси датчика, что уменьшает быстродействие синхронной передачи.

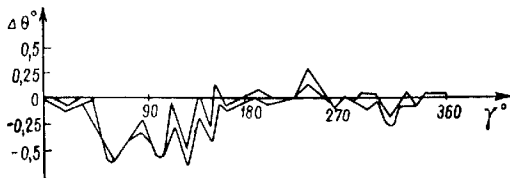


Рис. 97. Кривые статических ошибок бесконтактного селсина-приемника БС-404А.

Статическая добротность селсинов-приемников, выполненных до настоящего времени, находится в пределах $0,25 \div 1,5 \frac{1}{град}$. Селсины-приемники с добротностью $0,5 \frac{1}{град}$ и ниже следует относить к неточным приемникам, у которых статическая ошибка только от трения превышает один градус. Селсины-приемники с добротностью $1 \frac{1}{град}$ и выше следует относить к точным приемникам, у которых статическая ошибка от трения составляет менее одного градуса.

Момент трения не связан определенной зависимостью с углом поворота ротора селсина, в силу чего ошибки, вызываемые

моментом трения, не имеют заметной периодичности. Добавим, что момент трения селсина под током за счет вибрации несколько меньше, чем у невозбужденного селсина.

Неточность балансировки ротора и стрелки. Если центр тяжести ротора и стрелки селсина O' не лежит на оси вращения O (рис. 98), то на ротор селсина действует момент сил тяжести, обуславливающий появление статической ошибки при повороте ротора селсина.

Пусть ξ — угол между направлением стрелки и радиусом OO' , длину которого обозначим через ϵ ; θ_2 — угол между вертикалью и стрелкой, отсчитываемый по направлению вращения селсина. В этом случае момент силы тяжести может быть записан в виде

$$M_G = \epsilon G \sin(\theta_2 + \xi).$$

Этот момент уравнивается за счет рас-
согласования селсинов на некоторый угол $\Delta\theta_a^\circ$ (ошибка за счет неточной балансировки ротора)

$$m\Delta\theta_a^\circ = \epsilon G \sin(\theta_2 + \xi),$$

отсюда

$$\Delta\theta_a^\circ = \frac{\epsilon G}{m} \sin(\theta_2 + \xi). \quad (26.3)$$

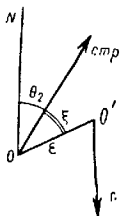


Рис. 98. Силы, возникающие вследствие неточной балансировки ротора селсина.

Статическая ошибка от неуравновешенности ротора имеет один полный период изменения за оборот ротора приемника. Для уменьшения этой ошибки должна быть предусмотрена статическая балансировка ротора. Максимальный момент неуравновешенности не должен превышать значения $(M_G)_{\max} = \epsilon G \leq 0,1m$.

Неточность балансировки ротора может особо неблагоприятно сказаться на работе селсина в условиях вибрации и тряски. Так, например, при тряске с ускорением $7g$ максимальная ошибка от неуравновешенности ротора может превысить подобную же ошибку при отсутствии ускорения — в 7 раз. Учитывая, что большинство селсинов работает в условиях вибрации и тряски, тщательная статическая балансировка роторов селсинов-приемников приобретает важное значение.

При эксплуатации систем синхронной связи следует учитывать, что стрелки, поводки или иные конструктивные элементы, устанавливаемые на оси селсинов-приемников, также должны быть тщательно отбалансированы во избежание увеличения статической ошибки селсина.

Неоднородность в магнитных свойствах стали. Листовая электротехническая сталь, из которой набираются

пакеты статоров и роторов селсинов, обладает различными магнитными свойствами вдоль и поперек прокатки. При индукциях, обычно встречающихся в селсинах (от 6000 до 16 000 гс), магнитная проницаемость вдоль прокатки на 20—25% выше магнитной проницаемости поперек прокатки листов. Поэтому, если собрать пакет статора или ротора так, чтобы направление прокатки во всех пластинах совпадало, то такой пакет, очевидно, будет обладать неодинаковой магнитной проводимостью в различных направлениях.

Проводимость пакета будет максимальной для того направления, которое будет совпадать с направлением прокатки листов, и минимальной для направления, перпендикулярного направлению прокатки листов.

Поэтому, если не принять специальных мер, магнитная проводимость пакета статора оказывается зависящей от угла поворота ротора селсина

$$\lambda = F(\theta_2).$$

Разлагая функцию $F(\theta_2)$ в ряд Фурье и ограничиваясь двумя членами, получим

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_2 \cos 2\theta_2,$$

где θ_2 — угол, отсчитываемый от направления, соответствующего наибольшей магнитной проводимости.

Реактивный момент, обусловленный переменной магнитной проводимостью, составит

$$M_\lambda = k \frac{d\lambda}{d\theta_2} = 2k\lambda_2 \sin 2\theta_2,$$

где k — некоторый коэффициент пропорциональности.

Ошибка от M_λ будет равна

$$\Delta\theta_\lambda^\circ = -\frac{2k\lambda_2}{m} \sin 2\theta_2. \quad (26.4)$$

Отсюда видно, что статическая ошибка за счет неоднородности магнитных свойств стали имеет два полных периода за оборот ротора.

Надежным средством уменьшения реактивного момента за счет неоднородности магнитных свойств стали является веерообразная сборка пакетов статора и ротора со сдвигом соседних листов в одном и том же направлении на одно зубцовое деление.

Для более полного уничтожения M_λ необходимо, чтобы число пластин N в пакете было: при четном числе пазов

$$N = \frac{n}{2} z,$$

при нечетном числе пазов — $N = nz$, где n — любое целое число, а z — число пазов.

В случае невозможности соблюдения этих условий следует изменить порядок сборки так, чтобы при сборке: при нечетном числе пазов — совершалось целое число обходов по окружности ($n 360^\circ$), а при четном числе пазов — целое число обходов по полуокружности ($n 180^\circ$).

Короткозамкнутые витки в трехфазной обмотке и в пакете стали той части магнитной цепи селсина (статор или ротор), на которой она намотана, точно также создают момент на роторе, изменяющийся с двойной периодичностью от угла поворота ротора. Это может быть пояснено на сле-

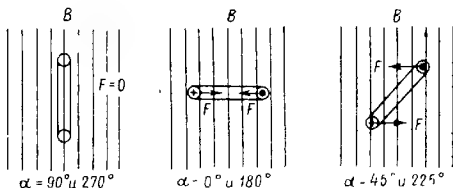


Рис. 99. Взаимодействие короткозамкнутого витка с переменным магнитным полем.

дующей весьма простой и наглядной модели (рис. 99). Для витка, помещенного в переменное магнитное поле, момент равен нулю при четырех положениях, соответствующих углам между нормалью к плоскости витка и направлением магнитного поля в $0, 90, 180$ и 270° . Момент будет наибольшим, если этот угол равен $45, 135, 225$ и 315° .

Отсюда нетрудно видеть, что зависимость момента от угла поворота ротора селсина по отношению к витку может быть выражена формулой

$$M_B = M_0 \sin 2\theta_2. \quad (26.5)$$

Этот момент накладывается на реактивный момент за счет неоднородностей в магнитных свойствах стали, в итоге чего образуется некоторый результирующий реактивный момент, имеющий двойной период изменения за один оборот ротора селсина-приемника.

Обычно достаточно замыкания нескольких витков обмотки синхронизации, чтобы ошибка селсина-приемника резко возросла. Поэтому намотку селсинов следует производить аккуратно, а после намотки производить тщательную проверку на отсутствие короткозамкнутых витков. Короткозамкнутые витки могут образоваться также в пакетах стали статора и ротора селсина вследствие плохой изоляции отдельных пла-

стин, а также из-за дефектов механической обработки пакета. Для устранения возможности образования короткозамкнутых витков в пакетах стали необходимо отдельные листы до сборки надежно изолировать, а пакет после сборки не подвергать механической обработке. Последнее особенно важно для того из пакетов селсина, на котором наматывается обмотка синхронизации, так как замыкание пластин другого пакета, на котором наматывается обмотка возбуждения, хотя также является нежелательным из-за увеличения потерь в селсине, но все же не ведет к увеличению ошибок селсина.

Реактивные моменты от зубчатого строения статора и ротора селсина. Наличие зубцов на статоре

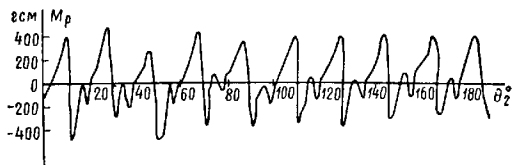


Рис. 100. Кривая реактивных моментов явнополюсного селсина НД-501 без скоса пазов на статоре и роторе.

и роторе селсина обуславливает зависимость магнитной проводимости воздушного зазора и зубцового слоя от угла поворота ротора по отношению к статору. В результате этого появляются зубцовые реактивные моменты, имеющие периодичность, кратную числу зубцов. Величина этих моментов, особенно для явнополюсных селсинов, может достигать нескольких сот гсм. На рис. 100 приведена кривая реактивных моментов явнополюсного селсина НД-501 без скоса пазов на статоре и роторе. Большие пики момента, достигающие до 400 гсм, обусловлены взаимодействием края полюса ротора с зубцами статора, а лежащие между ними более мелкие пики — взаимодействием зубцов статора и ротора.

Неявнополюсные селсины имеют, как правило, значительно меньшие значения зубцовых реактивных моментов.

Теоретический анализ реактивных моментов представляет значительные трудности. Он может быть осуществлен различными методами. Одним из распространенных методов является метод разложения магнитных проводимостей и м. д. с. в ряд Фурье с дальнейшим подсчетом реактивных моментов, имеющих периодичность, кратную числу зубцов.

Другие методы основаны на построении картин магнитного поля воздушного зазора и зубцового слоя для различных геометрий пазов и положений полюсов ротора по отно-

шению к пазам статора. По построенной картине полей вычисляется энергия магнитного поля $W_m(\theta_2)$, как функция угла поворота ротора θ_2 , и реактивный зубцовый момент по формуле

$$M_z = - \frac{\partial W_m}{\partial \theta_2}.$$

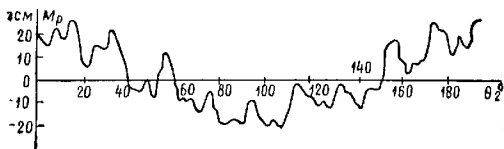


Рис. 101. Кривая реактивных моментов явнополюсного селсина НД-501 при скосе паза на одно зубцовое деление.

Недостаток метода — необходимость строить большое количество картин полей и трудности обобщения полученных результатов.

Одним из наиболее надежных способов борьбы с реактивными зубцовыми моментами является скос пазов статора на

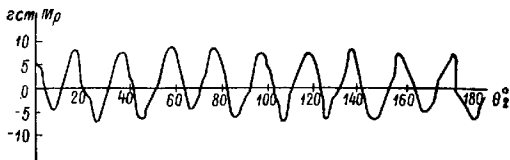


Рис. 102. Кривая зубцовых реактивных моментов селсина БС-404.

одно зубцовое деление. На рис. 101 приведена кривая реактивного момента селсина НД-501 при наличии скоса паза. Сравнивая ее с кривой рис. 100, можно видеть, что для селсина, имеющего скос паза, реактивный момент уменьшился приблизительно в 40 раз.

На рис. 101 можно отчетливо видеть результат наложения реактивного зубцового момента и момента, имеющего двойную периодичность за один оборот ротора.

У некоторых образцов селсинов двойная периодичность в силу симметрии магнитной цепи отсутствует и реактивный момент имеет чисто зубцовое происхождение. На рис. 102 приведена кривая зубцовых реактивных моментов селсина БС-404 при полюсной дуге 18 мм.

Как видно из всех приведенных кривых, зависимость зубцового реактивного момента от угла поворота ротора селсина приближенно может быть записана в виде

$$M_z = M_{zm} \sin z\theta_2, \quad (26.6)$$

где M_{zm} — амплитуда первой гармоники зубцового реактивного момента.

В заключение отметим, что существуют некоторые рекомендации, выполнение которых позволяет при проектировании селсинов получить достаточно низкие значения зубцовых реактивных моментов. К числу таких рекомендаций относятся:

1) в неявнополюсных селсинах числа пазов статора и ротора не должны иметь общих множителей, кроме множителя „три“, обусловленного трехфазной обмоткой;

2) в явнополюсных селсинах ширина полюсной дуги должна выбираться кратной зубцовому делению статора;

3) в селсинах с явнополюсным ротором число пазов статора предпочтительнее выбирать нечетным, так как при прочих равных условиях реактивный момент меньше, чем при четном числе пазов.

Реактивные моменты от неравномерного воздушного зазора и других факторов. Значительное влияние на величину реактивных моментов селсинов оказывают технологические погрешности при их изготовлении: неравномерный воздушный зазор и эксцентриситет в расположении статора и ротора селсина. Реактивные моменты, обусловленные этими факторами, имеют двойной период изменения за один оборот ротора.

Двойной периодичностью за оборот ротора порождаются ошибки за счет неравенства чисел витков в фазах и активных сопротивлений отдельных фаз синхронизирующей обмотки. Однако величина ошибок от этих причин в индикаторных селсинах оказывается незначительной.

Рассматривая моменты, возникающие от каждого из перечисленных выше факторов, можно утверждать, что суммарный момент, приложенный к ротору селсина, и вызывающий статические ошибки индикаторной синхронной передачи, может быть представлен в виде суммы четырех составляющих момента:

$$M_T(\theta_2) = M_T + M_{I_m} \sin(\theta_2 + \alpha_1) + M_{2m} \sin(2\theta_2 + \alpha_2) + \\ + M_{zm} \sin(z\theta_2 + \alpha_z), \quad (26.7)$$

т. е. момента трения в подшипниках и щетках, момента неуравновешенности ротора и стрелки, реактивного момента с двойной периодичностью и зубцового реактивного момента.

При анализе динамических ошибок селсина-приемника исходят из основного уравнения движения ротора приемника (25.1). В этом уравнении в качестве неизвестной функции целесообразно ввести угол рассогласования $\theta = \theta_2 - \theta_1$, где θ_1 — угол, определяющий положение ротора датчика.

Заменяя выражение электромагнитного момента $M_e(\theta, \dot{\theta})$ его значением при малых углах рассогласования, уравнение (25.1) перепишем в виде

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + T_D \frac{d\theta}{dt} + T_S \theta = I \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2). \quad (27.1)$$

Полученное уравнение справедливо для селсинов с электрическим демпфированием колебаний при согласовании. В случае использования так называемых инерционно-фрикционных демпферов должно быть учтено движение механического демпфера относительно ротора селсина.

Уравнение (27.1), вообще говоря, является нелинейным дифференциальным уравнением, поскольку $M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2)$ сложным образом зависит от $\theta_2 = \theta_1 + \theta$ и, следовательно, от угла рассогласования. Однако, если принять ошибку, как это и имеет место, величиной малой, то в правой части можно положить $\theta_2 = \theta_1$, т. е. считать заданной функцией времени. В этом приближении уравнение (27.1) становится линейным дифференциальным уравнением, в котором члены $I \frac{d^2\theta_1}{dt^2}$ и $M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2)$ играют роль вынуждающей силы. Решение такого уравнения сравнительно легко может быть проанализировано.

В дальнейшем ограничимся рассмотрением двух практически важных случаев: скорость вращения датчика постоянна $\dot{\theta}_1 = \text{const}$ (равномерная заводка); вращение датчика происходит по синусоидальному закону с некоторой угловой частотой Ω (синусная заводка)

$$\theta_1 = \theta_{1m} \sin \Omega t.$$

Динамические ошибки при равномерном вращении датчика. В этом случае $\frac{d^2\theta_1}{dt^2} = 0$ и динамические ошибки определяются выражением $M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2)$, представляющим собой внешний тормозной момент, приложенный к валу приемника.

При работе селсинов в индикаторном режиме $M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2)$ представляет собой сумму моментов сухого трения, неуравно-

вешенности ротора, реактивных моментов, рассмотренных выше

$$M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2) = -M_T \operatorname{sign} \dot{\theta}_2 + M_{1m} \sin(\theta_2 + \alpha_1) + M_{2m} \sin(2\theta_2 + \alpha_2) + M_{zm} \sin(z\theta_2 + \alpha_z), \quad (27.2)$$

где

$M_T \operatorname{sign} \dot{\theta}_2$ — момент сухого трения, зависящий от знака скорости;

$M_{1m} \sin(\theta_2 + \alpha_1)$ — момент неуравновешенности ротора;

$M_{2m} \sin(2\theta_2 + \alpha_2)$ — реактивный момент, обусловленный неоднородностью магнитных свойств стали, наличием короткозамкнутых витков, неравномерностью зазора и т. п.;

$M_{zm} \sin(z\theta_2 + \alpha_z)$ — зубцовый реактивный момент.

Так как при принятом допущении $\dot{\theta}_2$ считается величиной постоянной, то $M_T(\theta_2, \dot{\theta}_2)$ представляет собой сумму постоянного момента трения и моментов, изменяющихся во времени по синусоидальному закону.

Определим ошибку от каждой составляющей момента. Ошибку, обусловленную моментом трения, находим из дифференциального уравнения ($\dot{\theta}_2 > 0$)

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + T_D \frac{d\theta}{dt} + T_S \theta = -M_T,$$

отсюда для установившегося значения ошибки имеем

$$\theta_T = -\frac{M_T}{T_S}$$

или в градусах

$$\theta_T^\circ = -\frac{M_T}{m} = -\frac{1}{S}, \quad (27.3)$$

где S — статическая добротность селсина.

Ошибки от остальных трех составляющих момента находят из уравнения

$$I \frac{d^2\theta}{dt^2} + T_D \frac{d\theta}{dt} + T_S \theta = M_{km} \sin(k\theta_2 + \alpha_k) \quad (27.4)$$

$$(k = 1, 2, z).$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$\theta_k = \theta_{km} \sin(k\dot{\theta}_2 t + \alpha_k - \psi_k),$$

где

$$\theta_{km} = \frac{M_{km}}{\sqrt{(T_S - I k^2 \dot{\theta}_2^2)^2 + T_D^2 k^2 \dot{\theta}_2^2}},$$

$$\psi_k = \operatorname{arctg} \frac{k \dot{\theta}_2 T_D}{T_S - I k^2 \dot{\theta}_2^2}.$$

Вводя обозначения, использованные уже нами в главе III,

$\gamma = \sqrt{\frac{T_S}{I}}$ — собственная частота свободных колебаний ротора приемника;

$\lambda = \frac{T_D}{2I}$ — коэффициент затухания,

два последних выражения запишем в виде

$$\left. \begin{aligned} \theta_{km} &= \frac{M_{km}}{I \sqrt{(\gamma^2 - k^2 \dot{\theta}_2^2)^2 + 4\lambda^2 k^2 \dot{\theta}_2^2}} \\ \psi_k &= \arctg \frac{2\lambda k \dot{\theta}_2}{\gamma^2 - k^2 \dot{\theta}_2^2} \end{aligned} \right\}. \quad (27.5)$$

Из формулы (27.5) следует, что при некоторых скоростях вращения, определяемых из условия

$$\dot{\theta}_2 = \frac{\gamma}{k} \quad (k = 1, 2, z), \quad (27.6)$$

могут иметь место резонансные явления, приводящие к большим динамическим ошибкам.

При появлении больших динамических ошибок вследствие опасного явления резонанса необходимо так изменить параметры селсина или скорость его вращения, чтобы условие (27.6) не выполнялось.

В заключение заметим, что при сравнительно больших скоростях вращения, кроме момента сухого трения, следует учесть момент от вентиляционных потерь

$$M_v = -k_1 \left(\frac{d\theta_2}{dt} \right)^x \quad (x > 1).$$

Однако этот момент при рабочих скоростях селсинов весьма мал и, обычно, не учитывается.

Динамические ошибки при вращении датчика со скоростью, изменяющейся по синусоидальному закону. При синусоидальном движении датчика угол поворота его ротора изменяется по закону

$$\theta_1 = \theta_{1m} \sin \Omega t.$$

Рассмотрим вначале динамические ошибки для идеального случая, когда сухое трение и реактивные моменты у селсина-приемника равны нулю. В этом случае уравнение (27.1) примет вид:

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} + T_D \frac{d\theta}{dt} + T_S \theta = -I \Omega^2 \theta_{1m} \sin \Omega t.$$

Решением этого дифференциального уравнения будет

$$\theta = \theta_m \sin (\Omega t - \psi),$$

где

$$\theta_m = \theta_{1m} \frac{\Omega^2}{\sqrt{(\nu^2 - \Omega^2)^2 + 4\lambda^2 \Omega^2}}; \quad (27.7)$$

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{2\Omega\lambda}{\nu^2 - \Omega^2}.$$

При проверке селсинов угловая частота синусной заводки датчика имеет значение, близкое к единице ($\Omega \approx 1$), а угловая частота собственных колебаний селсина-приемника имеет значения $\nu \approx 20 + 30 \frac{1}{\text{сек}}$. При этом формула (27.7) может быть значительно упрощена

$$\theta_m = \theta_{1m} \frac{\Omega^2}{\nu^2}$$

или, заменяя $\nu^2 = \frac{T_S}{I}$ и T_S на m (с тем, чтобы выразить ошибку в градусах), получим

$$\theta_m^\circ = \theta_{1m} \frac{I\Omega^2}{m}.$$

Величину $\frac{m}{I} = D$ назовем динамической добротностью селсина. Тогда последнюю формулу запишем в виде

$$\theta_m^\circ = \theta_{1m} \frac{\Omega^2}{D}. \quad (27.8)$$

Произведем теперь учет сухого трения. Для этого функцию $-M_\tau \cdot \operatorname{sign} \dot{\theta}_2 = -M_\tau \cdot \operatorname{sign} \dot{\theta}_1$ представим в виде первой гармоники ряда Фурье (рис. 103)

$$-M_\tau \operatorname{sign} (\theta_{1m} \Omega \cos \Omega t) \approx -M' \cos \Omega t.$$

Амплитуду первой гармоники выберем, исходя из условия равенства работ против сил трения (равенство площадей действительной кривой и первой гармоники)

$$M' = M_\tau \frac{\pi}{2}.$$

В результате правая часть уравнения (27.1) примет вид

$$-I\Omega^2\theta_{1m} \sin \Omega t - M_\tau \frac{\pi}{2} \cos \Omega t = -A_m \sin (\Omega t + \varphi),$$

где

$$A_m = \sqrt{I^2\Omega^4\theta_{1m}^2 + \left(\frac{\pi}{2} M_\tau\right)^2};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{\pi M_\tau}{2I\Omega^2\theta_{1m}}.$$

Отсюда для максимального значения динамической ошибки с учетом сил трения получаем выражение

$$\theta'_m = \frac{A_m}{\sqrt{(T_S - I\Omega^2)^2 + \Omega^2 T_D^2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi M_T}{2I\Omega^2 \theta_{1m}}\right)^2} \times \theta_{1m} \frac{\Omega^2}{\sqrt{(\gamma^2 - \Omega^2)^2 + 4\lambda^2 \Omega^2}}. \quad (27.9)$$

Сравнивая с формулой (27.7), заключаем, что коэффициент $\sqrt{1 + \left(\frac{\pi M_T}{2I\Omega^2 \theta_{1m}}\right)^2}$ характеризует увеличение динамической ошибки за счет сухого трения.

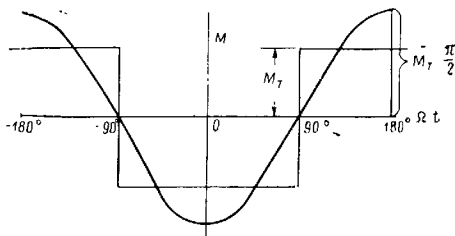


Рис. 103. Первая гармоника разложения момента трения в ряд Фурье.

Введем в формулу (27.9) упрощения в связи с тем, что $\Omega \ll \gamma$

$$\theta'_m = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi M_T}{2I\Omega^2 \theta_{1m}}\right)^2} \cdot \theta_{1m} \frac{\Omega^2}{\gamma^3} = \sqrt{4I^2 \Omega^4 \theta_{1m}^2 + \pi^2 M_T^2} \cdot \frac{1}{2T_S}$$

или, выражая ошибку в градусах, т. е. заменяя T_S на m , и вводя статическую $S = \frac{m}{M_T}$ и динамическую $D = \frac{m}{I}$ добротности селсина, получим

$$\theta_m^\circ = \sqrt{\left(\frac{\theta_{1m} \Omega^2}{D}\right)^2 + \left(\frac{\pi}{2S}\right)^2}. \quad (27.10)$$

В экспериментальных исследованиях селсинов принимают $\Omega = 1$ и $\theta_{1m} = 4\pi$. При этом формула (27.10) примет вид

$$\theta_m^\circ = \pi \sqrt{\left(\frac{4}{D}\right)^2 + \left(\frac{1}{2S}\right)^2}. \quad (27.11)$$

Следовательно, в тех случаях, когда динамическая добротность селсина значительно превосходит статическую добротность $D \gg S$, ошибки в динамике определяются статической добротностью селсина и, следовательно, по статическим

ошибкам можно судить и о динамических ошибках селсина. В общем случае это, конечно, не имеет места.

Реактивные моменты $M_k = M_{km} \cdot \sin(k\theta_s + \alpha_k)$ ($k = 1, 2, z$), как и в случае равномерного вращения селсинов, могут вызывать дополнительные динамические ошибки при скоростях вращения, соответствующих резонансу. Наибольшую опасность представляет случай, когда резонансная скорость совпадает с максимальной угловой скоростью вращения селсинов, так как при этом условие резонанса выполняется в течение большего промежутка времени.

Некоторое влияние на динамические ошибки приемника при синусной заводке оказывает механический демпфер, имеющийся у многих типов селсинов. Действительно, инерционно-фрикционный демпфер имеет упоры, которые в моменты, предшествующие реверсам приемника, создают дополнительные ударные инерционные нагрузки на ротор. В результате закон движения приемника будет отличаться от синусоидального, что и вызывает появление дополнительных динамических ошибок. Количественная оценка этих ошибок может быть сделана из рассмотрения законов движения ротора приемника и демпфера с учетом сил трения и упоров. При соответствующем выборе момента трения и угла между упорами динамическая ошибка от механического демпфера может быть незначительной.

§ 28. ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ И ЧАСТОТЫ СЕТИ НА ОШИБКИ СЕЛСИНОВ

Из сказанного выше следует, что статические и динамические ошибки обратно пропорциональны величине удельного момента. Поэтому для определения влияния изменения напряжения и частоты сети на точность селсинов достаточно рассмотреть влияние этих факторов на значение удельного момента.

Удельный момент селсина-приемника при работе его от однотипного датчика определяется выражением (12.4')

$$m_0 = \frac{3}{4} \frac{x_{af}^2}{z_f^2} U_f^2 \frac{x_q'}{r_q'^2 + x_q'^2} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360 f} \frac{20 \text{ м}}{2 \text{ град}}.$$

Для рассмотрения зависимости удельного момента от изменения частоты эту формулу запишем в виде

$$m_0 = A U_f^2 \frac{\lambda_q'}{r_q'^2 + (\lambda_q' f)^2}, \quad (28.1)$$

где

$A = \frac{3}{4} \frac{1,02 \cdot 10^3}{360} \left(\frac{x_{af}}{z_f} \right)^2 = \frac{3}{4} \cdot \frac{1,02 \cdot 10^3}{360} \cdot \left(\frac{x_{af}}{z_f} \right)^2$ — постоянный множитель, не зависящий от частоты;

λ'_q — эквивалентная проводимость в поперечной оси, определяемая из условия

$$x'_q = \lambda'_q f.$$

Для селсинов с электрическим демпфером множитель λ'_q зависит от частоты, однако, эту зависимость при малых изменениях частоты можно не учитывать.

Из формулы (28.1) легко находим относительное приращение удельного момента при изменении напряжения и частоты по формуле

$$\frac{\Delta m_0}{m_0} = \frac{1}{m_0} \left[\left(\frac{\partial m_0}{\partial U_f} \right)_f \Delta U_f + \left(\frac{\partial m_0}{\partial f} \right)_{U_f} \Delta f \right].$$

В результате получаем

$$\frac{\Delta m_0}{m_0} = \frac{2 \Delta U_f}{U_f} - \frac{2}{\gamma + 1} \cdot \frac{\Delta f}{f}, \quad (28.2)$$

где $\gamma = \frac{r'_q}{x'_q}$ — величина, близкая к единице для большинства селсинов.

Из формулы (28.2) видно, что колебания напряжения и частоты сети сказываются на величине удельного момента во взаимно противоположных направлениях: увеличение напряжения и уменьшение частоты сети приводит к увеличению удельного момента и, наоборот, уменьшение напряжения и увеличение частоты снижают удельный момент.

Следует подчеркнуть, что практически колебания напряжения и частоты сети происходят в одну сторону и эти два фактора в некоторой степени компенсируют друг друга.

Глава V

РАБОТА СЕЛСИНОВ В ТРАНСФОРМАТОРНОМ РЕЖИМЕ

§ 29. НАЗНАЧЕНИЕ И ПРИНЦИП РАБОТЫ

Синхронные передачи, в которых приемник работает в трансформаторном режиме, нашли широкое распространение как измерители угла рассогласования в следящих приводах. Эти синхронные передачи с достаточно высокой точностью и надежностью могут обеспечить дистанционное измерение угла между командной и исполнительной осями.

Принципиальная схема селсина-датчика и трансформаторного селсина-приемника представлена на рис. 104. В отличие от индикаторной в трансформаторной синхронной передаче однофазная обмотка селсина-приемника не подключена к сети. Однофазная обмотка приемника представляет собой генераторную обмотку, в которой индуцируется э. д. с., являющаяся величиной, характеризующей угол рассогласования между селсинами. Действительно, пульсирующий магнитный поток однофазной обмотки датчика индуцирует в фазах трехфазной обмотки э. д. с. $\dot{E}_A$, $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$, величина которых определяется углом между осью обмотки возбуждения и осью соответствующей фазы. Так, при синусоидально-распределенных магнитном потоке, обмотках селсина и их симметричном расположении можно принять:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_A &= \dot{E}_\phi \cdot \cos \gamma_1 \\ \dot{E}_B &= \dot{E}_\phi \cos (\gamma_1 - 120^\circ) \\ \dot{E}_C &= \dot{E}_\phi \cos (\gamma_1 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}, \quad (29.1)$$

где $\dot{E}_\phi$ — эффективное значение фазной э. д. с. синхронизирующей обмотки;

γ_1 — угол между осью обмотки возбуждения и осью фазы A.

Под влиянием электродвижущих сил в трехфазной цепи селсинов возникнут токи $\dot{I}_A$, $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$. Эти токи, протекая по фазам селсина-приемника, создадут в нем пульсирующее магнитное поле. Очевидно, что направление пульсирующего

магнитного поля приемника по отношению к фазам трехфазной обмотки будет таким же, как и в датчике, т. е. ось пульсирующего магнитного поля приемника составляет угол γ_1 с осью фазы A . При повороте ротора датчика на некоторый угол поле приемника также поворачивается на этот же угол. Пульсирующий магнитный поток приемника индуцирует в его однофазной (управляющей) обмотке э. д. с. $\dot{E}_y$, величина кото-

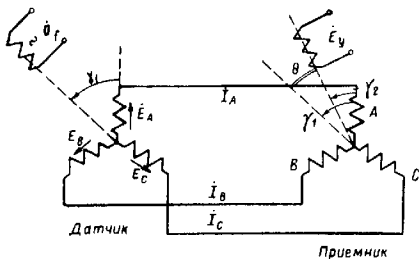


Рис. 104. Принципиальная схема трансформаторной синхронной передачи.

рой зависит от угла между осью пульсирующего магнитного потока и осью управляющей обмотки:

$$\dot{E}_y = \dot{E}_m \cos \theta, \quad (29.2)$$

где $\dot{E}_m$ — максимальное значение э. д. с. однофазной обмотки селсина-приемника.

Из рисунка 104 следует, что $\theta = \gamma_1 - \gamma_2$ — угол рассогласования между роторами датчика и приемника, где γ_2 — угол между осью управляющей обмотки и осью фазы A приемника.

Считать угол $\theta = 0$ для согласованного положения датчика и приемника нельзя, так как при этом по величине э. д. с. управляющей обмотки невозможно судить об угле рассогласования между селсинами. В самом деле, формула (29.2) показывает, что э. д. с. $\dot{E}_y$ не зависит от знака угла рассогласования, а при малых углах θ небольшие изменения угла рассогласования практически не отразятся на величине $\dot{E}_y$, в силу ее косинусной зависимости от угла рассогласования. Поэтому за согласованное положение датчика и приемника принимается такое положение, когда их оси взаимноперпендикулярны ($\theta = \frac{\pi}{2}$). Угол рассогласования селсинов, который мы обозна-

чим β , отсчитывается от этого согласованного положения. Очевидно,

$$\beta = \theta - \frac{\pi}{2} = \gamma_1 - \gamma_2 - \frac{\pi}{2}. \quad (29.3)$$

В этом случае для согласованного положения ось пульсирующего магнитного потока перпендикулярна управляющей обмотке и э. д. с. на ней равна нулю. При повороте датчика поле приемника поворачивается на такой же угол, что приводит к появлению на управляющей обмотке э. д. с., величина которой зависит по синусоидальному закону от угла рассогласования

$$\dot{E}_y = \dot{E}_m \sin \beta. \quad (29.4)$$

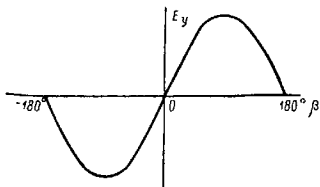


Рис. 105. Зависимость управляющей э. д. с. от угла рассогласования β .

Если поворот датчика производится в обратную сторону, то э. д. с. управляющей обмотки изменяется по фазе на 180° . На рис. 105 приведен график зависимости э. д. с. управляющей обмотки, как функции угла рассогласования β с учетом изменения фазы. Как видно из графика, по значению э. д. с. управляющей обмотки и ее фазе можно судить о величине угла рассогласования и о его знаке.

Таким образом, дистанционное измерение угла рассогласования с помощью трансформаторной синхронной передачи осуществляется по следующему принципу. Селсин-датчик преобразует угол поворота в систему трех э. д. с., совпадающих по фазе; при этом каждому угловому положению ротора датчика соответствует вполне определенная система значений фазных э. д. с. статорной обмотки. Эта совокупность трех э. д. с. датчика и является электрическим сигналом, передаваемым приемнику. В приемнике этот сигнал преобразуется в пульсирующий магнитный поток, который индуцирует э. д. с. в управляющей обмотке приемника. Значение э. д. с. и является мерой угла рассогласования между датчиком и приемником.

Эта э. д. с., предварительно усиленная, используется как управляющее напряжение (отсюда и название управляющая обмотка приемника) для вращения исполнительного двигателя, приводящего к согласованию оси датчика и приемника (рис. 106).

Схема, изображенная на данном рисунке, представляет собой принципиальную схему следящей системы. Основное преимущество этой схемы по сравнению с индикаторной синхронной передачей угла состоит в том, что она позволяет

весьма точно производить передачу угла при наличии значительного момента на приемной оси. Недостаток ее — необходимость усилителей, двигателей и т. п., сильно усложняющих передачу угла. Рассмотрение следящих систем не входит в задачу настоящей книги.

Схема передачи угла с трансформаторным селсином-приемником, так же как и индикаторная синхронная передача, позволяет легко осуществлять сложение или вычитание нескольких передаваемых угловых величин путем включения между датчиком и приемником электрических дифференциалов (рис. 107).

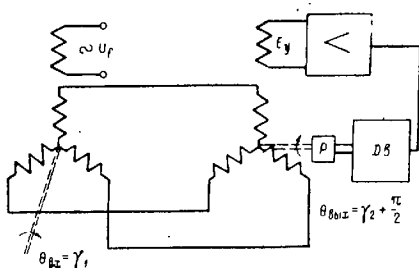


Рис. 106. Принципиальная схема следящей системы с использованием трансформаторной синхронной передачи:
 $Дв$ — двигатель; P — редуктор; $<$ — усилитель.

Основными показателями, характеризующими работу трансформаторного селсина-приемника, являются: крутизна выходной (управляющей) э. д. с.; удельная мощность в оптимальном режиме, т. е. при согласовании нагрузки с управляющей обмоткой; выходное сопротивление $z_{вых}$ и, наконец, статические и динамические ошибки. Остановимся более подробно на каждом из указанных выше показателей трансформаторного селсина-приемника.

Крутизна управляющей э. д. с. Крутизна э. д. с. управляющей обмотки представляет собой приращение э. д. с. этой обмотки при изменении угла рассогласования на 1° около положения согласования. Ее значение обычно задается в $\frac{\text{вольт}}{\text{град}}$. Требования к величине крутизны управляющей э. д. с. определяются чувствительностью усилительного устройства.

Крутизна управляющей э. д. с. зависит от магнитного потока селсина-приемника и числа витков его управляющей обмотки; обычно у трансформаторных селсинов крутизна э. д. с. управ-

ляющей обмотки лежит в пределах от 0,5 до 2 $\frac{\text{вольт}}{\text{град}}$. При включении нагрузки крутизна управляющей э. д. с. падает.

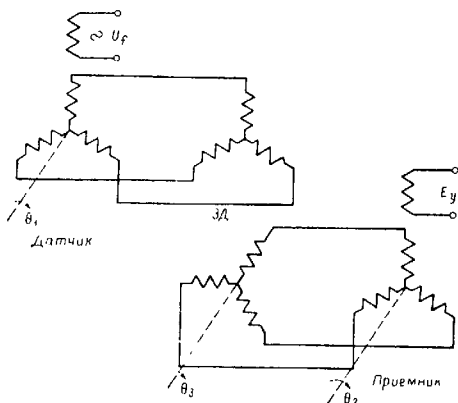


Рис. 107. Схема трансформаторной синхронной передачи с дифференциальными селсинами.

В этом случае ее правильнее называть не управляющей э. д. с., а управляющим напряжением.

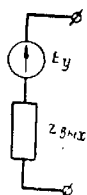


Рис. 108. Эквивалентная схема управляющей обмотки.

Выходное сопротивление — $z_{\text{вых}}$. Выходное сопротивление трансформаторного селсина-приемника представляет собой сопротивление, которое имеет управляющая обмотка, если ее рассматривать как некоторый генератор электрического тока (рис. 108). Очевидно, что выходное сопротивление равно полному сопротивлению управляющей обмотки, измеренному при закороченной обмотке возбуждения датчика.

Величина выходного сопротивления управляющей обмотки приемника зависит как от параметров датчика, так и от параметров приемника, и может меняться в широких пределах за счет изменения числа витков управляющей обмотки селсина-приемника. Однако при этом будет изменяться и крутизна управляющей э. д. с.

Выходное сопротивление имеет важное значение. Его величина должна быть согласована со входом усилителя. Очевидно, что трансформаторные селсины-приемники, рабо-

тающие на усилители с низкоомным входом, должны иметь малые значения выходного сопротивления.

Удельная мощность в оптимальном режиме. При заданной э. д. с. управляющей обмотки мощность, отдаваемая трансформаторным селсином-приемником, зависит от величины нагрузки. Для омической нагрузки наибольшая отдаваемая мощность имеет место, если $R_{\text{н}} = z_{\text{вых}}$. Это значение мощности, отнесенное к единице угла рассогласования, обычно к 1° , и называется удельной мощностью селсина-приемника. Удельная мощность измеряется в $\frac{\text{вт}}{\text{град}^2}$.

Статическая ошибка. Положим, что при согласовании датчика и трансформаторного селсина-приемника управляющее напряжение равно нулю. Если теперь поворачивать датчик и приемник на равные углы, то на управляющей обмотке появится напряжение, которое может быть скомпенсировано за счет поворота ротора приемника. Этот дополнительный угол поворота и представляет собой статическую ошибку.

Подробно статические ошибки трансформаторной синхронной передачи рассматриваются в § 31 п. „б“.

Величина статической ошибки бывает от нескольких минут до десятков минут.

Динамическая ошибка. Динамическая ошибка обусловливается появлением управляющей э. д. с. в согласованных датчике и приемнике при их вращении с некоторой скоростью. В дальнейшем вместо термина „динамическая“ ошибка будем использовать более точный термин — „скоростная“ ошибка. Величина скоростной ошибки зависит от скорости вращения селсинов и частоты сети; так, например, для селсинов на 50 гц и скоростях вращения до 300 об/мин. скоростная ошибка может иметь значение 1—2°.

Методы расчета показателей, характеризующих трансформаторный селсин-приемник, приводятся в последующих параграфах, посвященных теории работы селсинов в трансформаторном режиме. В гл. VIII даются способы экспериментального определения этих показателей.

§ 30. ТЕОРИЯ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СИНХРОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

При теоретическом рассмотрении трансформаторной синхронной передачи будем исходить из эквивалентных схем преобразованных к осям d и q . Это позволит нам воспользоваться результатами, полученными в гл. II. На основании этих результатов трансформаторная синхронная передача может быть представлена так, как это показано на рис. 109. Примем, что датчик и приемник, имея различные параметры, вращаются с некоторой скоростью ω при угле рассогласования $\beta = \theta - \frac{\pi}{2}$

Составим уравнения э. д. с. рассматриваемой схемы. Потокосцепления контуров d_1 и q_1 датчика и d_2 , q_2 приемника определяем, соответственно, по формулам (11.3), (9.15), заменив в них δ на $\frac{\pi}{2} + \beta$ и положив для приемника $\dot{E}_\phi = 0$ (нет возбуждения). Получим:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi}_{d1} &= -j\dot{E}_\phi \sin \beta + [x_{c1}(j) - x_{u1}(j) \cos 2\beta] \dot{I}_{d1} + \\ &\quad + x_{u1}(j) \sin 2\beta \dot{I}_{q1} \\ \dot{\psi}_{q1} &= -j\dot{E}_\phi \cos \beta + [x_{c1}(j) + x_{u1}(j) \cos 2\beta] \dot{I}_{q1} + \\ &\quad + x_{u1}(j) \sin 2\beta \dot{I}_{d1} \\ \dot{\psi}_{d2} &= x_{d2}(j) \dot{I}_{d2} \\ \dot{\psi}_{q2} &= x_{q2}(j) \dot{I}_{q2} \end{aligned} \right\}, \quad (30.1)$$

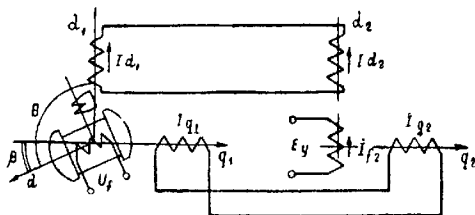


Рис. 109. Принципиальная схема трансформаторной синхронной передачи в осях d и q .

где индексом 1 обозначены величины, относящиеся к датчику, а индексом 2 — к приемнику. При определении операторного сопротивления приемника $x_{d2}(j)$ по формуле (9.12) следует иметь в виду, что к параметрам управляющей обмотки $r_2 + jx_{f2}$ должно быть прибавлено сопротивление нагрузки $\dot{z}_н$:

$$x_{d2}(j) = x_{d2} - \frac{3}{2} \frac{jx_{af2}^2}{r_f + jx_{f2} + \dot{z}_н}.$$

Сопротивление $x_{q2}(j) = x_{q2}$ не является переходным, так как трансформаторный селсин-приемник не имеет электрического демпферного контура в поперечной оси. Напомним также, что

$$x_{c1}(j) = \frac{x_{d1}(j) + x_{q1}(j)}{2}, \quad x_{u1}(j) = \frac{x_{d1}(j) - x_{q1}(j)}{2}.$$

Подставляя потокосцепления (30.1) в уравнения для э. д. с. (9.14) и учитывая (см. рис. 109), что

$$\dot{U}_{d1} = \dot{U}_{d2}; \quad \dot{U}_{q1} = \dot{U}_{q2}; \quad I_{d1} = -I_{d2}; \quad I_{q1} = -I_{q2},$$

найдем:

$$\left. \begin{aligned} A\dot{I}_{d2} + B\dot{I}_{q2} &= \dot{E}_\phi (\sin \beta - jv \cos \beta) \\ C\dot{I}_{d2} + D\dot{I}_{q2} &= \dot{E}_\phi (\cos \beta + jv \sin \beta) \end{aligned} \right\}, \quad (30.2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} A &= r_1 + r_2 + j[x_{d2}(j) + x_{c1}(j) - x_{u1}(j) \cos 2\beta] + \\ &\quad + vx_{u1}(j) \sin 2\beta \\ B &= v[x_{q2} + x_{c1}(j) + x_{u1}(j) \cos 2\beta] + jx_{u1}(j) \sin 2\beta \\ C &= -v[x_{d2}(j) + x_{c1}(j) - x_{u1}(j) \cos 2\beta] + jx_{u1}(j) \sin 2\beta \\ D &= r_1 + r_2 + j[x_{q2} + x_{c1}(j) + x_{u1}(j) \cos 2\beta] - \\ &\quad - vx_{u1}(j) \sin 2\beta \end{aligned} \right\} \quad (30.3)$$

Из уравнений (30.2) для любых значений параметров датчика и приемника, скорости вращения ротора и угла рассогласования β можно найти ток $\dot{I}_{d2}$, а затем и напряжение на управляющей обмотке по формуле:

$$\dot{U}_y = \dot{z}_u \dot{I}_{f2} = \frac{3}{2} \dot{z}_u \frac{jx_{af2} \dot{I}_{d2}}{r_{f2} + jx_{f2} + \dot{z}_u}. \quad (30.4)$$

Рассмотрим практически важный случай работы трансформаторной синхронной передачи: режим синхронного поворота $v=0$ и малого угла рассогласования β .

В этом случае выражения (30.3) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} A &= r_1 + r_2 + j[x_{d2}(j) + x_{c1}(j)] \\ B &= C = j[x_{d1}(j) - x_{q1}(j)] \sin \beta \\ D &= r_1 + r_2 + j[x_{q2} + x_{d1}(j)] \end{aligned} \right\}. \quad (30.3')$$

Действительно, поскольку β малая величина, то

$$\begin{aligned} x_{c1}(j) - x_{u1}(j) \cos 2\beta &= \frac{x_{d1}(j) + x_{q1}(j)}{2} - \\ - \frac{x_{d1}(j) - x_{q1}(j)}{2} \cos 2\beta &= x_{d1}(j) \sin^2 \beta + x_{q1}(j) \cos^2 \beta \approx x_{q1}(j); \end{aligned}$$

совершенно аналогично находим, что

$$x_{c1}(j) + x_{u1}(j) \cos 2\beta \approx x_{d1}(j).$$

Уравнения (30.2) запишутся в виде:

$$\left. \begin{aligned} \{r_1 + r_2 + j[x_{d2}(j) + x_{q1}(j)]\} \dot{I}_{d2} + j[x_{d1}(j) - \\ - x_{q1}(j)] \sin \beta \dot{I}_{q2} &= \dot{E}_\Phi \sin \beta \\ j[x_{d1}(j) - x_{q1}(j)] \sin \beta \dot{I}_{d2} + \{r_1 + r_2 + j[x_{q2} + \\ + x_{d1}(j)]\} \dot{I}_{q2} &= \dot{E}_\Phi \end{aligned} \right\} \quad (30.5)$$

Решая эти уравнения относительно тока $\dot{I}_{d2}$ и подставляя в формулу (30.4), найдем:

$$\begin{aligned} \dot{U}_y &= \frac{3}{2} \frac{j x_{af2} \dot{z}_n}{r_{f2} + j x_{f2} + \dot{z}_n} \times \\ &\times \frac{[r_1 + r_2 + j x_{q2} + j x_{q1}(j)] \dot{E}_\Phi \sin \beta}{[r_1 + r_2 + j x_{d2}(j) + j x_{q1}(j)] [r_1 + r_2 + j x_{q2} + j x_{d1}(j)]}. \end{aligned} \quad (30.6)$$

Используя обозначения эквивалентных схем (см. § 10), формулу (30.6) запишем в более компактном виде:

$$\dot{U}_y = j \frac{3}{2} x_{af2} \frac{\dot{z}_n}{\dot{z}_{f2} + \dot{z}_n} \cdot \frac{(\dot{z}'_{q1} + \dot{z}'_{q2}) \dot{E}_\Phi \sin \beta}{(\dot{z}'_{q1} + \dot{z}'_{d2})(\dot{z}'_{d1} + \dot{z}'_{q2})}. \quad (30.6')$$

Полагая $\dot{z}_n = \infty$, получим формулу для управляющей э. д. с. $\dot{E}_y$ селсина-приемника:

$$\dot{E}_y = j \frac{3}{2} x_{af2} \frac{[r_1 + j x_{q1}(j) + r_2 + j x_{q2}] \dot{E}_\Phi \sin \beta}{[r_1 + j x_{q1}(j) + r_2 + j x_{d2}] [r_1 + j x_{d1}(j) + r_2 + j x_{q2}]}. \quad (30.6'')$$

Рассмотрим два частных случая:

а) приемник неявнополюсный $x_{d2} = x_{q2}$, поэтому

$$\dot{E}_y = j \frac{3}{2} x_{af2} \frac{\dot{E}_\Phi \sin \beta}{r_1 + j x_{d1}(j) + r_2 + j x_{q2}}.$$

В этом случае демпферный контур датчика не оказывает влияния на работу трансформаторной синхронной передачи;

б) приемник явнополюсный, но датчик с электрическим демпфером и его параметры удовлетворяют условию $x_{d1}(j) = x_{q1}(j)$, тогда

$$\dot{E}_y = j \frac{3}{2} x_{af2} \frac{\dot{E}_\Phi \sin \beta}{r_1 + j x_{q1}(j) + r_2 + j x_{d2}}.$$

Приведенные два типа трансформаторных синхронных передач являются наиболее распространенными. Контактные трансформаторные селсины-приемники выполняются неявнополюсными, так как при этом они потребляют меньший намаг-

ничающий ток, что особенно важно при параллельной работе селсинов. Датчики трансформаторных синхронных передач выбираются с электрическим демпфером в поперечной оси, так как в этом случае выходное сопротивление селсина-приемника практически не зависит от угла рассогласования.

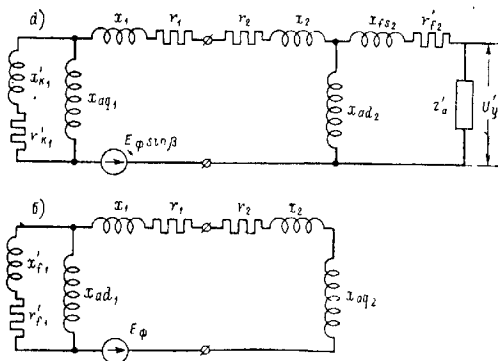


Рис. 110. Эквивалентная схема трансформаторной селсинной передачи: *а* — для цепи управления; *б* — для цепи намагничивания.

При выполнении датчика с электрическим демпфером в поперечной оси можно приближенно принять $x_{d1}(j) \approx x_{q1}(j)$. В результате этого уравнения (30.5) значительно упрощаются:

$$\left. \begin{aligned} \{r_1 + r_2 + j[x_{d2}(j) + x_{q1}(j)]\} \dot{I}_{d2} &= \dot{E}_\phi \sin \beta \\ \{r_1 + r_2 + j[x_{q2} + x_{d1}(j)]\} \dot{I}_{q2} &= \dot{E}_\phi \end{aligned} \right\}. \quad (30.7)$$

Нетрудно видеть, что этим уравнениям соответствуют эквивалентные схемы для продольного (цепь управления) и поперечного (цепь намагничивания) контуров трансформаторной синхронной передачи, изображенные на рис. 110, *а* и *б*. Все величины, обозначенные на этих схемах, приведены к трехфазной синхронизирующей обмотке селсинов.

Указанные схемы весьма удобны при расчетах намагничивающих токов трансформаторного селсина-приемника, крутизны выходного напряжения и выходного сопротивления $Z_{\text{вых}}$.

Следует иметь в виду, что они дают правильный результат, если хотя бы приближенно выполняется условие для параметров датчика $x_{d1}(j) \approx x_{q1}(j)$.

Выражение для управляющего напряжения при этом имеет более простой вид:

$$\dot{U}_y = \frac{3}{2} \frac{j x_{af2} \dot{z}_{11}}{r_{f2} + j x_{f2} + \dot{z}_{11}} \cdot \frac{\dot{E}_\Phi \sin \beta}{[r_1 + r_2 + j x_{d2}(j) + j x_{q1}(j)]}. \quad (30.8)$$

Удельная мощность трансформаторного селсина-приемника определяется для активной нагрузки $z_R = R_R$ как мощность, отдаваемая этой нагрузке при рассогласовании датчика и приемника на 1° .

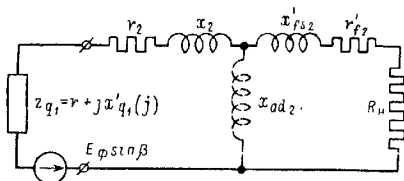


Рис. 111. Упрощенная эквивалентная схема трансформаторной селсинной передачи.

Из формулы (30.6'') получаем для удельной мощности

$$P_0 = \frac{U_y^2(1^\circ)}{R_R} = \frac{9}{4} \frac{x_{af2}^2 R_R}{|z'_{f2} + R_R|^2} \cdot \frac{|\dot{z}'_{q1} + \dot{z}'_{q2}|^2 E_\Phi^2 \sin^2 1^\circ}{|\dot{z}'_{q1} + \dot{z}'_{d2}|^2 |\dot{z}'_{d1} + \dot{z}'_{q2}|^2}. \quad (30.9)$$

Из этой формулы после её упрощения видно, что удельная мощность имеет максимальное значение при $R_R = z_{\text{вых}}$.

Для датчиков с электрическим демпферным контуром удельная мощность может быть определена более простым приближенным методом, основанным на использовании эквивалентной схемы (рис. 110, б).

Считая параметр x_{ad2} приемника значительно большим, чем r'_{f2} , x'_{fs2} и приведенное сопротивление нагрузки, получаем упрощенную эквивалентную схему (рис. 111).

Из нее следует, что управляющее напряжение, приведенное к цепи синхронизации, будет равно

$$\dot{U}'_y = \frac{R'_R \dot{E}_\Phi \sin \beta}{R'_R + r'_{q1} + r_2 + r'_{f2} + j(x'_{q1} + \dot{x}_2 + x'_{fs2})} \quad (30.10)$$

и соответственно удельная мощность

$$P_0 = \frac{U_y^2(1^\circ)}{R'_R} = \frac{R'_R E_\Phi^2 \sin^2 1^\circ}{(R'_R + r'_{q1} + r_2 + r'_{f2})^2 + (x'_{q1} + x_2 + x'_{fs2})^2}. \quad (30.11)$$

Удельная мощность имеет максимальное значение при согласовании нагрузки с выходным сопротивлением, т. е. при

$$R'_n = \sqrt{(r'_{q1} + r_2 + r'_{f2})^2 + (x'_{q2} + x_2 + x'_{fs2})^2},$$

что также следует и из формулы (30.11).

Отсюда получаем, что удельная мощность в оптимальном режиме может быть подсчитана по формуле:

$$P_{0m} = \frac{E_{\Phi}^2 \sin^2 1^\circ}{2(r'_{q1} + r_2 + r'_{f2}) \sqrt{1 + \left(\frac{x'_{q1} + x_2 + x'_{fs2}}{r'_{q1} + r_2 + r'_{f2}} \right)^2}} \frac{\text{ватт}}{\text{град}^2} \cdot (30.12)$$

§ 31. ОШИБКИ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ СИНХРОННОЙ ПЕРЕДАЧИ

Из полученного выше выражения для управляющего напряжения трансформаторного селсина-приемника [см. формулу (30.6)] следует, что в согласованном положении $\beta = 0$ управляющее напряжение также равно нулю. Однако это верно только для идеальных селсинов, для которых и были составлены указанные выше уравнения. Практически, вследствие наличия различного рода конструктивных и технологических погрешностей, даже в согласованном положении на управляющей обмотке имеется некоторое остаточное напряжение $\Delta \dot{U}_y$. Это напряжение $\Delta \dot{U}_y$ в общем случае не совпадает по фазе с управляющим напряжением $\dot{U}_y$ (рис. 112). При рассмотрении его можно допустить, что оно состоит из двух составляющих: $\Delta \dot{U}_{y_1}$ — совпадающей по фазе с $\dot{U}_y$ (ее называют напряжением ошибки) и $\Delta \dot{U}_{y_2}$ — сдвинутой от $\dot{U}_y$ на 90° (ее называют остаточным напряжением)¹. Первая составляющая $\Delta \dot{U}_{y_1}$ может быть скомпенсирована за счет поворота ротора приемника на некоторый угол $\Delta \beta$, что и обуславливает ошибку трансформаторной синхронной передачи при работе ее в следящих системах.

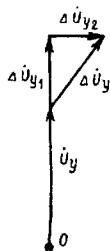


Рис. 112. Векторная диаграмма управляющего напряжения и напряжения ошибки.

Вторая составляющая $\Delta \dot{U}_{y_2}$ не может быть скомпенсирована поворотом ротора селсина-приемника. Поскольку в усилительных схемах следящего привода имеется, как правило, фазочувствительный элемент, то составляющая $\Delta \dot{U}_{y_2}$ не вносит

¹ Кроме остаточного напряжения, э. д. с. управляющей обмотки может содержать высшие гармоники, которые здесь не рассматриваются.

ошибку в следящую систему; однако это напряжение затрудняет работу при регулировке усилителей и следящих систем.

Величина ошибки $\Delta\beta$, от первой составляющей напряжения $\Delta\dot{U}_{y_1}$, зависит как от положения ротора селсина-приемника по отношению к статору (статическая ошибка), так и от скорости вращения селсинов (скоростная ошибка); ее иногда называют динамической ошибкой [16]. Рассмотрим более подробно, какими факторами определяются скоростная и статическая ошибки трансформаторной синхронной передачи и каким образом они могут быть подсчитаны.

А. Скоростная ошибка трансформаторной синхронной передачи

При вращении селсинов в управляющей обмотке селсина-приемника, кроме трансформаторной э. д. с., зависящей от угла рассогласования, появляется э. д. с. вращения, величина которой определяется скоростью вращения селсинов. Э. д. с. вращения имеет составляющую, совпадающую по фазе с управляющим напряжением, и обуславливает появление скоростной ошибки.

Для получения выражения э. д. с. вращения надо исходить из уравнений (30.2), справедливых для любой скорости вращения селсинов v . Однако, получение легко анализируемого результата в общем виде при любых соотношениях параметров весьма затруднительно. Поэтому ограничимся рассмотрением более простого случая. Имеем: неявнополюсный приемник $x_{d_2} = x_{q_2}$, датчик с демпферным контуром, так что его параметры удовлетворяют условию $x_{d_1}(j) = x_{q_1}(j)$, малую скорость вращения селсинов v и угол рассогласования β . Полученные результаты качественно остаются верными и для трансформаторных синхронных передач с другими соотношениями параметров.

При принятых допущениях уравнения э. д. с. (30.2) запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} \{r_1 + r_2 + j[x_{d_2}(j) + x_{q_1}(j)]\} \dot{I}_{d_2} + v[x_{q_2} + \\ + x_{d_1}(j)] \dot{I}_{q_2} = \dot{E}_\Phi (\sin \beta - jv) \\ - v[x_{d_2}(j) + x_{q_1}(j)] \dot{I}_{d_2} + \{r_1 + r_2 + j[x_{q_2} + \\ + x_{d_1}(j)]\} \dot{I}_{q_2} = \dot{E}_\Phi (1 + jv \sin \beta) \end{aligned} \right\}. \quad (31.1)$$

Положим, что управляющая обмотка селсина-приемника включена на высокоомную нагрузку $\dot{z}_n \gg r_{f_2} + jx_{f_2}$. В этом

случае приближенно можно принять $x_{d2}(j) \approx x_{d2} = x_{q2}$, что позволит уравнения (31.1) записать в симметричном виде:

$$\left. \begin{aligned} [r + jx(j)] \dot{I}_{d2} + vx(j) \dot{I}_{q2} &= \dot{E}_\Phi (\sin \beta - \dots) \\ - vx(j) \dot{I}_{d2} + [r + jx(j)] \dot{I}_{q2} &= \dot{E}_\Phi (1 - jv \sin \beta) \end{aligned} \right\}, \quad (31.2)$$

где

$$\begin{aligned} r &= r_1 + r_2; \\ x(j) &= x_{d2} + x_{q1}(j) = x_{q2} + x_{d1}(j). \end{aligned}$$

Решая уравнения (31.2) относительно тока $\dot{I}_{d2}$ и пренебрегая при этом членами с v^2 , найдем

$$\dot{I}_{d2} = \frac{\dot{E}_\Phi}{r + jx(j)} \left[\sin \beta - \frac{jrv}{r + jx(j)} \right] \quad (31.3)$$

и, соответственно, для э. д. с. на управляющей обмотке приемника получим

$$\dot{E}_y = j \frac{3}{2} x_{af2} \frac{\dot{E}_\Phi}{r + jx(j)} \left[\sin \beta - \frac{jrv}{r + jx(j)} \right]. \quad (31.4)$$

Полученная формула показывает, что управляющая э. д. с. состоит из двух частей. Первая часть, пропорциональная $\sin \beta$, представляет собой трансформаторную э. д. с., зависящую от угла рассогласования. Вторая часть, пропорциональная скорости вращения релсинов v , — есть э. д. с. вращения. Нетрудно видеть, что эта э. д. с. вращения имеет две составляющие: а) совпадающую по фазе с трансформаторной э. д. с. и б) сдвинутую от нее на 90° .

Составляющая э. д. с., совпадающая по фазе с трансформаторной э. д. с., приведет к появлению так называемой скоростной ошибки трансформаторной синхронной передачи.

Величина скоростной ошибки легко определяется из выражения, стоящего в квадратных скобках в формуле (31.4), и равна

$$\Delta \beta_v^\circ = 57,3^\circ \frac{rx'}{r^2 + x'^2} v, \quad (31.5)$$

где

$$\begin{aligned} r' &= r_2 + r'_d = r_2 + r'_q; \\ x' &= x_{d2} + x'_{q1} = x_{q2} + x'_{d1}. \end{aligned}$$

Для неявнополюсных приемников, для которых и рассматривается скоростная ошибка, $x' \gg r'$; поэтому приближенно можно принять

$$\Delta \beta_v^\circ \approx 57,3^\circ \frac{r_2 + r'_{q1}}{x_{d2} + x'_{q1}} v. \quad (31.6)$$

Из этих формул следует, что скоростная ошибка селсина-приемника в трансформаторной синхронной передаче зависит от скорости вращения и соотношения активного и индуктивного сопротивлений цепи синхронизации селсинов. При переходе в трансформаторных синхронных передачах на более высокие частоты отношение $\frac{r_2 + r'_{q1}}{x_{d2} + x'_{q1}}$ и относительная скорость вращения v падают, обуславливая значительное уменьшение скоростной ошибки.

Для селсинов частотой 50 гц отношение $\frac{r_2 + r'_{q1}}{x_{d2} + x'_{q1}}$ лежит в пределах 0,1 ÷ 0,3; это значит, что скоростная ошибка при скорости вращения 300 об/мин. ($v = 0,1$) может быть в пределах 0,6 ÷ 2°. В то же самое время для селсинов на 500 гц отношение $\frac{r_2 + r'_{q1}}{x_{d2} + x'_{q1}}$ не превосходит 0,1, а v , соответственно, равно 0,01 (при той же скорости вращения 300 об/мин.), что приводит к значению скоростной ошибки, не превышающему 0,06°.

Одним из способов уменьшения скоростной ошибки в следящих системах является сдвиг фазы опорного напряжения фазочувствительного усилителя таким образом, чтобы оно оказалось в квадратуре с э. д. с. вращения. Однако при этом происходит снижение эффективной крутизны управляющей э. д. с.

Б. Статические ошибки трансформаторной синхронной передачи

Статическая ошибка трансформаторной синхронной передачи зависит от углового положения роторов датчика и приемника. Статическая ошибка была бы сведена на нет, если бы все обмотки были распределены синусоидально, воздушный зазор был бы равномерным, а трехфазная обмотка — симметричной.

В действительности эти условия не выполняются в силу конструктивных ограничений и несовершенства технологии изготовления селсинов. Поэтому возникают статические ошибки от конструктивных ограничений и статические ошибки от неточности изготовления. Первый тип ошибок обусловлен несинусоидальностью распределения обмоток и наличием пазов на статоре и роторе. Второй тип ошибок определяется несимметрией цепей трехфазной обмотки при изготовлении селсина и непосредственно вызван различными значениями активных и индуктивных сопротивлений обмоток как за счет неравенства числа витков, так и за счет наличия коротко-

замкнутых витков в обмотке и пакете железа, эксцентричным положением ротора по отношению к статору, неоднородностью магнитных свойств железа и т. п.

Рассмотрим вначале статические ошибки от несинусоидального распределения обмоток. Эти ошибки могут иметь место как у датчика, так и у приемника.

При определении ошибок датчика будем считать приемник симметричным и имеющим одинаковые сопротивления фаз. Точно также при определении ошибок приемника выходное напряжение датчика будем считать совершенно симметричным и изменяющимся по синусоидальному закону от угла поворота ротора.

1. Статические ошибки от несинусоидальности распределения обмоток датчика. Статические ошибки, создаваемые селсином-датчиком, вызваны тем, что э. д. с. его синхронизирующей обмотки изменяется от угла поворота ротора датчика не по синусоидальному закону в силу несинусоидальности как м. д. с., так и распределения обмоток.

Выразим э. д. с. синхронизирующей обмотки датчика как функцию угла γ_1 между осью фазы A и осью обмотки возбуждения. Для селсина-датчика с явнополюсным ротором магнитная индукция по расточке статора имеет зависимость от угла, представленную на рис. 113. Ее разложение в ряд Фурье имеет вид:

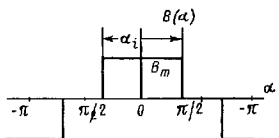


Рис. 113. Кривая поля в явнополюсном селсине.

$$B(\alpha) = \frac{4B_m}{\pi} \left(\sin \frac{\alpha_i}{2} \cos \alpha + \frac{1}{3} \sin \frac{3\alpha_i}{2} \cos 3\alpha + \right. \\ \left. + \frac{1}{5} \sin \frac{5\alpha_i}{2} \cos 5\alpha + \dots \right), \quad (31.7)$$

где $B_m = \frac{0,4\pi I_f w_f}{\sqrt{2}\delta_0}$ — максимальное значение магнитной индук-

ции под полюсом;

α_i — полюсная дуга в угловых единицах;

α — угол, отсчитываемый от оси полюса;

I_f — сила тока в обмотке возбуждения;

w_f — число витков обмотки возбуждения;

δ_0 — эквивалентный воздушный зазор.

Обозначим через x — расстояние, отсчитываемое по расточке статора от оси фазы A .

Тогда $\alpha = \frac{\pi}{\tau} x - \gamma_1$, где

τ — полюсное деление. Формулу (31.7) запишем в виде

$$B(x) = \sum_{n=1,3,5,\dots} B_n \cos n \left(\frac{\pi}{\tau} x - \gamma_1 \right), \quad (31.8)$$

где

$$\bar{B}_n = \frac{4B_m}{\pi \cdot n} \sin n \frac{\alpha_l}{2}. \quad (31.9)$$

Совершенно аналогичное выражение имеет место для индукции магнитного поля в случае распределенной обмотки на роторе, только с другим значением B_n :

$$B_n = \frac{0,4\pi I w k_{np}}{\sqrt{2} \delta'_0 n}, \quad (31.9')$$

где k_{np} — обмоточный коэффициент для n -й гармоники обмотки возбуждения.

Магнитный поток, пронизывающий виток фазы A , считая, что обмотка выполнена с диаметральной шагом, будет равен

$$\begin{aligned} \Phi &= l \int_{-\tau/2}^{\tau/2} \sum_{n=1,3,5,\dots} B_n \cos n \left(\frac{\pi}{\tau} x - \gamma_1 \right) dx = \\ &= \frac{2l\tau}{\pi} \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{B_n}{n} \cos n\gamma_1 \cdot \sin n \frac{\pi}{2}, \end{aligned}$$

где l — длина пакета статора.

Заменяя $\frac{2l\tau}{\pi} B_1$ на равную ей Φ_1 , где Φ_1 — магнитный поток 1-й гармоники магнитной индукции, получим

$$\Phi = \Phi_1 \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{B_n}{B_1} \frac{\cos n\gamma_1}{n} \sin \left(n \frac{\pi}{2} \right). \quad (31.10)$$

При определении потокоцепления фазы A синхронизирующей обмотки нужно принять во внимание, что обмотка выполняется распределенной, имеет укорочение шага и пакет статора выполняется с пазами, скошенными на одно зубцовое деление. Это приводит к появлению для каждой гармоники потокоцепления вместо множителя $\sin n \frac{\pi}{2}$ для диаметральной обмотки своих обмоточного коэффициента и коэффициента скоса паза. В результате для потокоцепления фазы A получим следующее выражение:

$$\psi_A = \psi_1 \sum_{n=1,3,5,\dots} \frac{B_n}{B_1} \frac{k_{nc} \cdot k_{ns}}{k_{1c} k_{1s}} \frac{\cos n\gamma_1}{n}$$

и, соответственно, для э. д. с.

$$\dot{E}_A = \dot{E}_1 \sum \frac{B_n}{B_1} \frac{k_{nc} k_{ns}}{k_{1c} k_{1s}} \frac{\cos n\gamma_1}{n}, \quad (31.11)$$

где

$k_{nc} = k_{psc} k_{ync} = \frac{\sin n \frac{\pi}{2m}}{\frac{z}{2mp} \sin n \frac{\pi}{z}} \sin n \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2}$ — обмоточный коэффициент n -й гармоники фазы синхронизирующей обмотки;

$k_{ns} = \frac{\sin n \frac{\pi}{z}}{n \cdot \frac{\pi}{z}}$ — коэффициент скоса паза для n -й гармоники;

в написанных выражениях:

z — число пазов на статоре;

m — число фаз статора;

p — число пар полюсов;

y — шаг обмотки.

Обычно для селсинов принято $m=3$ и $p=1$, поэтому получим

$$k_{nc} = \frac{\sin n \frac{\pi}{6}}{\frac{z}{6} \sin n \frac{\pi}{z}} \sin \left(n \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2} \right), \quad (31.12)$$

а для произведения $k_{nc} \cdot k_{ns}$

$$k_{nc} k_{ns} = \frac{6}{\pi n} \sin n \frac{\pi}{6} \sin \left(n \frac{y}{\tau} \frac{\pi}{2} \right). \quad (31.13)$$

Подставляя в формулу (31.11) полученные выше выражения B_n — (31.9) и (31.9'), получим для э. д. с. фазы A статора

$$\dot{E}_A = \dot{E}_1 \sum_{n=1,3,5,\dots} a_n \cos n\gamma_1, \quad (31.14)$$

где для явнополюсного ротора с сосредоточенной обмоткой

$$a_n = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{k_{nc} k_{ns}}{k_{1c} k_{1s}} \frac{\sin n \frac{\alpha_l}{2}}{\sin \frac{\alpha_l}{2}} \quad (31.15)$$

и для неявнополюсного ротора с распределенной обмоткой

$$a_n = \frac{1}{n^2} \frac{k_{nc} k_{ns} k_{np}}{k_{1c} k_{1s} k_{1p}}. \quad (31.15')$$

Напомним, что в приведенных формулах индексом „с“ обозначены величины, относящиеся к статору, а индексом „р“ к ротору.

Аналогичные выражения можно получить для двух других фаз статора B и C при замене γ_1 на $\gamma_1 - 120^\circ$ и $\gamma_1 + 120^\circ$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_B &= \dot{E}_1 \sum_{n=1, 3, 5, \dots} a_n \cos n(\gamma_1 - 120^\circ) \\ \dot{E}_C &= \dot{E}_1 \sum_{n=1, 3, 5, \dots} a_n \cos n(\gamma_1 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}. \quad (31.14')$$

Чтобы получить выражение для э. д. с. управляющей обмотки селсина-приемника, работающего от датчика, фазные э. д. с. которого определяются формулами (31.14), перейдем к координатам d и q ; при этом:

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_d &= \frac{2}{3} [\dot{E}_A \cos \gamma_1 + \dot{E}_B \cos (\gamma_1 - 120^\circ) + \\ &\quad + \dot{E}_C \cos (\gamma_1 + 120^\circ)] \\ \dot{E}_q &= \frac{2}{3} [\dot{E}_A \sin \gamma_1 + \dot{E}_B \sin (\gamma_1 - 120^\circ) + \\ &\quad + \dot{E}_C \sin (\gamma_1 + 120^\circ)] \end{aligned} \right\}. \quad (31.16)$$

Подставляя сюда выражения для $\dot{E}_A$ — (31.14) и аналогичные для $\dot{E}_B$ и $\dot{E}_C$ — (31.14'), а также выполняя несложные тригонометрические преобразования, получим

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_d &= \dot{E}_1 [1 + (a_5 + a_7) \cos 6\gamma_1 + (a_{11} + a_{13}) \cos 12\gamma_1 + \dots] \\ \dot{E}_q &= \dot{E}_1 [(a_5 - a_7) \sin 6\gamma_1 + (a_{11} - a_{13}) \sin 12\gamma_1 + \dots] \end{aligned} \right\}. \quad (31.17)$$

Найдем токи в эквивалентных продольном и поперечном контурах селсина, считая угол рассогласования β малым (см. рис. 109).

При составлении уравнений э. д. с. будем пренебрегать переменной составляющей параметров $x_{d_1}(j)$, $x_{q_1}(j)$ датчика, обусловленной высшими гармоническими потокоцепления.

Уравнения э. д. с. этих контуров будут представлять собой уравнения вида (30.5); отличие состоит только в правой части. При составлении уравнений (30.5) имели $\dot{E}_d = \dot{E}_1 = \dot{E}_\Phi$; $\dot{E}_q = 0$; в данном же случае э. д. с. $\dot{E}_d$ и $\dot{E}_q$ выражаются формулами (31.17).

В результате получим

$$\left. \begin{aligned} [r_1 + r_2 + jx_{d_2}(j) + jx_{q_1}(j)] \dot{I}_{d_2} + \\ + j[x_{d_1}(j) - x_{q_1}(j)] \sin \beta \dot{I}_{q_2} &= \dot{E}_d \sin \beta - \dot{E}_q \\ j[x_{d_1}(j) - x_{q_1}(j)] \sin \beta \dot{I}_{d_2} + \\ + [r_1 + r_2 + jx_{q_2}(j) + jx_{d_1}(j)] \dot{I}_{q_2} &= \dot{E}_d + \dot{E}_q \sin \beta \end{aligned} \right\}. \quad (31.18)$$

Решая эти уравнения относительно тока $\dot{I}_{d_2}$ и пренебрегая членами с $\sin^2 \beta$, найдем

$$\dot{I}_{d_2} = \frac{[r_2 + jx_{q_2} + r_1 + jx_{q_1}(j)] \dot{E}_d \sin \beta}{[r_1 + jx_{q_1}(j) + r_2 + jx_{d_2}(j)][r_1 + jx_{q_1}(j) + r_2 + jx_{q_2}] - \frac{\dot{E}_q}{r_1 + jx_{q_1} + r_2 + jx_{d_2}(j)}} -$$

Подставляя сюда выражения (31.17), в которых в данном случае можно приближенно принять $\dot{E}_d \approx \dot{E}_1$, получим:

$$\dot{I}_{d_2} = \frac{(z_{q_2} + \dot{z}'_{q_1}) \dot{E}_1}{(\dot{z}'_{q_1} + \dot{z}'_{d_2})(\dot{z}'_{d_1} + \dot{z}'_{q_2})} \left\{ \sin \beta - \frac{\dot{z}'_{d_1} + \dot{z}'_{q_2}}{\dot{z}'_{q_2} + \dot{z}'_{q_1}} [(a_5 - a_7) \sin 6\gamma_1 + \right. \\ \left. + (a_{11} - a_{13}) \sin 12\gamma_1 + \dots] \right\}.$$

Поскольку $\dot{E}_y = j \frac{3}{2} x_{af_2} \dot{I}_{d_2}$, то из последней формулы непосредственно получается значение ошибки от несинусоидальности распределения обмоток:

$$\Delta \beta^\circ = -57,3^\circ Re \frac{\dot{z}'_{d_1} + \dot{z}'_{q_2}}{\dot{z}'_{q_2} + \dot{z}'_{q_1}} [(a_5 - a_7) \sin 6\gamma_1 + \\ + (a_{11} - a_{13}) \sin 12\gamma_1 + \dots].$$

Так как в большинстве случаев на практике можно принять

$$Re \frac{\dot{z}'_{d_1} + \dot{z}'_{q_2}}{\dot{z}'_{q_1} + \dot{z}'_{q_2}} \approx 1,$$

то

$$\Delta \beta^\circ = -57,3^\circ [(a_5 - a_7) \sin 6\gamma_1 + (a_{11} - a_{13}) \sin 12\gamma_1 + \dots]. \quad (31.19)$$

Формула (31.19) показывает, что статические ошибки от несинусоидальности распределения поля в воздушном зазоре датчика имеют за один оборот ротора периодичность, кратную шести.

Пример. Определить значение статических ошибок от несинусоидальности распределения обмоток датчика, у которого

$$z = 18; \frac{y}{\tau} = \frac{7}{9}; \alpha_l = 90^\circ.$$

При решении ограничимся рассмотрением ошибки от 5-й и 7-й гармоник м. д. с.

$$\Delta \beta^\circ = -57,3^\circ (a_5 - a_7) \sin 6\gamma_1.$$

По формулам (31.15) и (31.13) имеем:

$$a_5 = \frac{1}{5^3} \cdot \frac{\sin 5 \frac{\pi}{6} \cdot \sin 5 \frac{7}{9} \frac{\pi}{2} \sin 5 \frac{\pi}{4}}{\sin \frac{\pi}{6} \sin \frac{7}{9} \frac{\pi}{2} \sin \frac{\pi}{4}} = 1,48 \cdot 10^{-3};$$

$$a_7 = \frac{1}{7^3} \cdot \frac{\sin 7 \frac{\pi}{6} \sin 7 \frac{7}{9} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \sin 7 \frac{\pi}{4}}{\sin \frac{\pi}{6} \cdot \sin \frac{7}{9} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \sin \frac{\pi}{4}} = 2,38 \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда ошибка $\Delta\beta'$, выраженная в минутах, будет равна

$$\Delta\beta' = -57,3 \cdot 60 \cdot 10^{-3} (1,48 - 2,38) \sin 6\gamma_1 = 3,1 \sin 6\gamma_1,$$

т. е. максимальная статическая ошибка от несинусоидальности м. д. с. составляет $3,1'$.

2. Статические ошибки от несинусоидальности распределения обмоток приемника. Положим, что датчик не создает ошибок и его фазные э. д. с. изменяются по синусоидальному закону в зависимости от угла γ_1 (формулы 29.1). Переходя к продольной и поперечной осям d и q по формулам (31.16), получим

$$\dot{E}_d = \dot{E}_\phi; \quad \dot{E}_q = 0.$$

Как и выше (п. 1), при вычислении токов будем пренебрегать переменной составляющей от высших гармоник в индуктивностях приемника. Уравнения э. д. с. трансформаторной синхронной передачи при малых углах рассогласования (рис. 109) будут представлять собой уравнения (30.5).

Решая эти уравнения относительно токов $\dot{I}_{d_2}$ и $\dot{I}_{q_2}$ и пренебрегая членами с $\sin^2 \beta$, получим

$$\dot{I}_{d_2} = \frac{(\dot{z}'_{q_1} + \dot{z}'_{q_2}) \dot{E}_\phi \sin \beta}{(\dot{z}'_{q_1} + \dot{z}'_{d_2})(\dot{z}'_{d_1} + \dot{z}'_{q_2})};$$

$$\dot{I}_{q_2} = \frac{\dot{E}_\phi}{\dot{z}'_{d_1} + \dot{z}'_{q_2}}.$$

По формулам (8.3) находим токи в фазах селсина-приемника:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_\phi}{\dot{z}'_{d_1} + \dot{z}'_{q_2}} \left[\sin \gamma_2 + \frac{\dot{z}'_{q_2} + \dot{z}'_{q_1}}{\dot{z}'_{d_2} + \dot{z}'_{q_1}} \sin \beta \cos \gamma_2 \right] \quad (31.20)$$

и аналогичные выражения для токов $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ при замене γ_2 на $\gamma_2 - 120^\circ$ и $\gamma_2 + 120^\circ$.

Полагая, что $\frac{\dot{z}_{q2} + \dot{z}'_{q1}}{\dot{z}'_{d2} + \dot{z}_{q1}} \approx 1$ и β — малый угол, формулу (31.20) запишем в виде:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_\Phi}{\dot{z}'_{d1} + \dot{z}_{q2}} \sin(\gamma_2 + \beta) = - \frac{\dot{E}_\Phi}{\dot{z}'_{d1} + \dot{z}_{q2}} \cos \gamma_1 = \dot{I} \cos \gamma_1. \quad (31.21)$$

Таким же путем находятся выражения $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$.

Заметим, что при $\beta \rightarrow 0$ формула (31.21) выполняется точно. Поскольку статические ошибки определяются при $\beta = 0$, то, используя в дальнейшем формулу (31.21), мы не вносим погрешности.

Знак минус в формуле (31.21) указывает на фазу тока $\dot{I}_A$ по отношению к $\dot{E}_\Phi$.

Магнитодвижущая сила, создаваемая каждой из фаз синхронизирующей обмотки селсина-приемника, может быть представлена в виде гармонического ряда:

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_A &= \sum_{n=1,3,5} \dot{F}_n \cos n \frac{\pi}{\tau} x \cos \gamma_1 \\ \dot{F}_B &= \sum_{n=1,3,5} \dot{F}_n \cos n \left(\frac{\pi}{\tau} x - 120^\circ \right) \cos(\gamma_1 - 120^\circ) \\ \dot{F}_C &= \sum_{n=1,3,5} \dot{F}_n \cos n \left(\frac{\pi}{\tau} x + 120^\circ \right) \cos(\gamma_1 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}, \quad (31.22)$$

где $\dot{F}_n$ — амплитуда n -й гармоники м. д. с. в воздушном зазоре, определяемая формулой $F_n = 0,9 \frac{\omega k_{nc}}{n} I$.

Результирующая м. д. с. получается путем суммирования выражений (31.22):

$$\dot{F}(x) = \dot{F}_A + \dot{F}_B + \dot{F}_C = \dot{F}'_1 + \dot{F}'_5 + \dot{F}'_7 + \dot{F}'_{11} + \dot{F}'_{13} + \dots,$$

где

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}'_1 &= \frac{3}{2} \dot{F}_1 \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x - \gamma_1 \right) \\ \dot{F}'_5 &= \frac{3}{2} \dot{F}_5 \cos \left(5 \frac{\pi}{\tau} x + \gamma_1 \right) \\ \dot{F}'_7 &= \frac{3}{2} \dot{F}_7 \cos \left(7 \frac{\pi}{\tau} x - \gamma_1 \right) \end{aligned} \right\}. \quad (31.23)$$

и т. д.

Будем отсчитывать расстояние x' по расточке статора от оси управляющей обмотки. Очевидно,

$$\frac{\pi}{\tau} x' = \frac{\pi}{\tau} x - \gamma_2;$$

при этом выражения (31.23) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}'_1 &= \frac{3}{2} \dot{F}_1 \cos \left(\frac{\pi}{\tau} x' + \gamma_2 - \gamma_1 \right) \\ \dot{F}'_5 &= \frac{3}{2} \dot{F}_5 \cos \left(5 \frac{\pi}{\tau} x' + 5\gamma_2 + \gamma_1 \right) \\ \dot{F}'_7 &= \frac{3}{2} \dot{F}_7 \cos \left(7 \frac{\pi}{\tau} x' + 7\gamma_2 - \gamma_1 \right) \end{aligned} \right\} \quad (31.24)$$

и т. д.

Теперь уже нетрудно найти от каждой гармоники м. д. с. магнитную индукцию в зазоре, а затем потокоцепление и э. д. с. управляющей обмотки. Для этого находим магнитные потоки от каждой из гармоник м. д. с. путем интегрирования

выражений $\frac{F'_n}{\delta_0}$, с учетом скоса паза в пределах от $-\frac{\alpha_l}{2}$ до

$+\frac{\alpha_l}{2}$ для явнополюсного селсина и от $-\frac{\tau}{2}$ до $+\frac{\tau}{2}$ для неявнополюсного селсина. По магнитным потокам, учитывая для неявнополюсного селсина эффект распределения обмотки, находим управляющую э. д. с.

В результате получим

$$\dot{E}_y = \dot{E}_{1y} + \dot{E}_{5y} + \dot{E}_{7y} + \dot{E}_{11y} + \dot{E}_{13y} + \dots, \quad (31.25)$$

где в случае явнополюсного селсина-приемника

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1y} &= \dot{E}_1 \cos(\gamma_1 - \gamma_2); \\ \dot{E}_{5y} &= \dot{E}_1 \frac{F_5 \cdot k_{5s} \cdot \sin 5 \frac{\alpha_l}{2}}{F_1 \cdot k_{1s} \cdot \sin \frac{\alpha_l}{2}} \cdot \frac{\cos(\gamma_1 + 5\gamma_2)}{5}; \\ \dot{E}_{7y} &= \dot{E}_1 \frac{F_7 \cdot k_{7s} \cdot \sin 7 \frac{\alpha_l}{2}}{F_1 \cdot k_{1s} \cdot \sin \frac{\alpha_l}{2}} \cdot \frac{\cos(\gamma_1 - 7\gamma_2)}{7} \end{aligned}$$

и т. д.;

и неявнополюсного селсина приемника

$$\begin{aligned} \dot{E}_{1y} &= \dot{E}_1 \cos(\gamma_1 - \gamma_2); \\ \dot{E}_{5y} &= \dot{E}_1 \frac{F_5 \cdot k_{5s} \cdot k_{5p}}{F_1 \cdot k_{1s} \cdot k_{1p}} \cdot \frac{\cos(\gamma_1 + 5\gamma_2)}{5}; \\ \dot{E}_{7y} &= \dot{E}_1 \frac{F_7 \cdot k_{7s} \cdot k_{7p}}{F_1 \cdot k_{1s} \cdot k_{1p}} \cdot \frac{\cos(\gamma_1 - 7\gamma_2)}{7} \text{ и т. д.} \end{aligned}$$

Учитывая выражения для F_n , а также то, что $\gamma_1 - \gamma_2 = -\frac{\pi}{2} + \beta$, формулу (31.25) запишем в виде:

$$\dot{E}_y = -\dot{E}_1 [\sin \beta + b_5 \sin(\beta + 6\gamma_2) + b_7 \sin(\beta - 6\gamma_2) + \dots], \quad (31.26)$$

где для явнополюсного приемника

$$b_n = \frac{1}{n^2} \cdot \frac{k_{nc} \cdot k_{ns} \cdot \sin \frac{n\alpha_i}{2}}{k_{1c} \cdot k_{1s} \cdot \sin \frac{\alpha_i}{2}}, \quad (31.27)$$

а для неявнополюсного приемника

$$b_n = \frac{1}{n^2} \frac{k_{nc} \cdot k_{ns} \cdot k_{np}}{k_{1c} \cdot k_{1s} \cdot k_{1p}}. \quad (31.28)$$

Легко видеть, что полученные выражения совпадают с коэффициентами a_n для датчика [см. формулы (31.15) и (31.15')].

Из формулы (31.26), полагая $\beta = 0$, получаем статическую ошибку от несинусоидального распределения обмоток приемника:

$$\Delta\beta^\circ = 57,3^\circ [(b_5 - b_7) \sin 6\gamma_2 + (b_{11} - b_{13}) \sin 12\gamma_2 + \dots]. \quad (31.29)$$

Пример. Определить статическую ошибку от 5-й и 7-й гармоник в кривой м. д. с. статора явнополюсного приемника при $z = 12$; $y/\tau = 2/3$; $\alpha_i = 90^\circ$.

Решение:

По формулам (31.28) и (31.13) находим

$$b_5 = \frac{1}{5^2} \cdot \frac{\sin 5 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \sin 5 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2}}{\sin \frac{\pi}{6} \cdot \sin \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sin 5 \cdot \frac{\pi}{4}}{\sin \frac{\pi}{4}} = 8 \cdot 10^{-3};$$

$$b_7 = \frac{1}{7^2} \cdot \frac{\sin 7 \cdot \frac{\pi}{6} \cdot \sin 7 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2}}{\sin \frac{\pi}{6} \cdot \sin \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi}{2}} \cdot \frac{\sin 7 \cdot \frac{\pi}{4}}{\sin \frac{\pi}{4}} = 2,9 \cdot 10^{-3}.$$

Отсюда:

$$\Delta\beta' = 57,3 \cdot 60 \cdot (8 - 2,9) \cdot 10^{-3} \cdot \sin 6\gamma_2 = 17,5 \cdot \sin 6\gamma_2.$$

На рис. 114 приведена кривая статических ошибок селсин-приемника, выполненного по указанным выше данным. Кривая, очевидно, имеет шестикратную периодичность за один оборот с амплитудой около $40'$. Здесь удвоенное значение статической ошибки по сравнению с величиной этой ошибки, полученной при расчете, объясняется тем, что селсин-приемник работал от однотипного датчика. В этом случае ошибки, кратные шести, как это следует из формул (31.19) и (31.29), складываются.

Если в данном селсине выполнить обмотку с $\frac{y}{\tau} = \frac{5}{6}$, а полюсную дугу взять $\alpha_i = 74^\circ$, то амплитуда статической ошибки от 5-й до 7-й гармоник не превышает 4-х минут.

На ошибки от несинусоидальности м. д. с. обмоток селсина будут накладываться ошибки от пазов статора и ротора селсина. Эти ошибки будут иметь периодичность, кратную числу

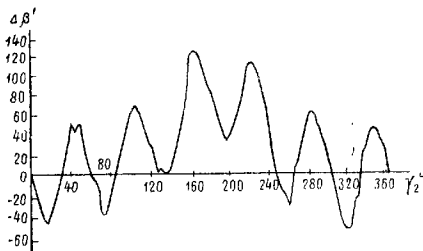


Рис. 114. Кривая статических ошибок трансформаторного селсина-приемника при $Z = 12$; $\alpha_i = 90^\circ$ и $\frac{\beta}{\tau} = \frac{2}{3}$.

пазов. Методика вычисления этих ошибок приведена в [46]. При наличии скоса паза на одно зубцовое деление, что, как правило, выполняется в селсинах, ошибки от зубчатого строения статора и ротора оказываются незначительными.

3. Статические ошибки от неточности изготовления.

При рассмотрении ошибок, связанных с неточностью изготовления селсинов, ограничимся рассмотрением двух типов погрешностей: неравенство активных и индуктивных сопротивлений фазных цепей синхронизирующей обмотки. Примем, что селсин-приемник представляет собой неявнопо-

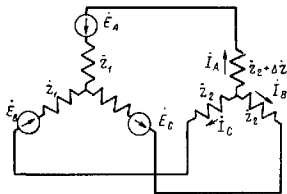


Рис. 115. Схема трансформаторной синхронной передачи с несимметрией одной фазы.

люсную машину, а параметры фаз датчика не зависят от угла поворота ротора.

Положим, что датчик симметричен, а одна из фаз приемника, например А, имеет параметры, отличные от других двух фаз. Соответствующая этому случаю схема трансформаторной синхронной передачи приведена на рис. 115, где

$\dot{z}_1$ — полное сопротивление фазы датчика;

$\dot{z}_2$ — полное сопротивление фазы приемника;

Δz — отклонение сопротивления фазы A от ее номинального значения;

I_A, I_B, I_C — токи в фазах A, B и C приемника;
 $\dot{E}_A, \dot{E}_B, \dot{E}_C$ — э. д. с. в фазах датчика.

Очевидно

$$\begin{aligned} I_A + I_B + I_C &= 0; \\ \dot{E}_A &= \dot{E}_\Phi \cos \gamma_1; \\ \dot{E}_B &= \dot{E}_\Phi \cos (\gamma_1 - 120^\circ); \\ \dot{E}_C &= \dot{E}_\Phi \cos (\gamma_1 + 120^\circ), \end{aligned} \quad (31.30)$$

где $\dot{E}_\Phi$ — фазное значение э. д. с. датчика;

γ_1 — угол между осью фазы A и осью обмотки возбуждения датчика.

Составим уравнения 2-го закона Кирхгофа для контуров схемы, представленной на рис. 185:

$$\begin{aligned} (\dot{z}_2 + \Delta \dot{z}) \dot{I}_A - jx_m (\dot{I}_B + \dot{I}_C) + \dot{z}_1 \dot{I}_A - \dot{z}_m (\dot{I}_B + \dot{I}_C) - \dot{z}_1 \dot{I}_B + \\ + \dot{z}_m (\dot{I}_A + \dot{I}_C) - \dot{z}_2 \dot{I}_B + jx_m (\dot{I}_A + \dot{I}_C) = \dot{E}_B - \dot{E}_A; \quad (31.31) \\ (\dot{z}_2 + \Delta \dot{z}) \dot{I}_A - jx_m (\dot{I}_B + \dot{I}_C) + \dot{z}_1 \dot{I}_A - \dot{z}_m (\dot{I}_B + \dot{I}_C) - \dot{z}_1 \dot{I}_C + \\ + \dot{z}_m (\dot{I}_A + \dot{I}_B) - \dot{z}_2 \dot{I}_C + jx_m (\dot{I}_A + \dot{I}_B) = \dot{E}_C - \dot{E}_A, \end{aligned}$$

где x_m — реактивное сопротивление взаимной индукции фаз приемника;

$\dot{z}_m$ — сопротивление взаимной индукции фаз датчика с учетом влияния демпферного контура и обмотки возбуждения.

Принимая во внимание соотношение между токами, уравнения (31.31) перепишем в виде:

$$\begin{aligned} (\dot{z}_1 + \dot{z}_2 + \dot{z}_m + jx_m + \Delta \dot{z}) \dot{I}_A - (\dot{z}_1 + \dot{z}_2 + \dot{z}_m + jx_m) \dot{I}_B = \dot{E}_B - \dot{E}_A; \\ (\dot{z}_1 + \dot{z}_2 + \dot{z}_m + jx_m + \Delta \dot{z}) \dot{I}_A - (\dot{z}_1 + \dot{z}_2 + \dot{z}_m + jx_m) \dot{I}_C = \\ = \dot{E}_C - \dot{E}_A. \end{aligned}$$

Обозначив $\dot{z}_1 + \dot{z}_2 + \dot{z}_m + jx_m = \dot{z}$ и учитывая формулы (31.30), получим:

$$\begin{aligned} (\dot{z} + \Delta \dot{z}) \dot{I}_A - \dot{z} \dot{I}_B = \sqrt{3} \dot{E}_\Phi \sin (\gamma_1 - 60^\circ); \quad (31.32) \\ (\dot{z} + \Delta \dot{z}) \dot{I}_A - \dot{z} \dot{I}_C = -\sqrt{3} \dot{E}_\Phi \sin (\gamma_1 + 60^\circ). \end{aligned}$$

Решая уравнения (31, 32) относительно токов $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ и считая $\Delta \dot{z} \ll \dot{z}$, найдем:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= -\frac{\dot{E}_\Phi}{\dot{z}} \left(1 - \frac{2\Delta \dot{z}}{3\dot{z}} \right) \cos \gamma_1; \\ \dot{I}_B &= -\frac{\sqrt{3} \dot{E}_\Phi}{\dot{z}} \sin (\gamma_1 - 60^\circ) + \dot{I}_A \left(1 + \frac{\Delta \dot{z}}{\dot{z}} \right); \\ \dot{I}_C &= \frac{\sqrt{3} \dot{E}_\Phi}{\dot{z}} \sin (\gamma_1 + 60^\circ) + \dot{I}_A \left(1 + \frac{\Delta \dot{z}}{\dot{z}} \right).\end{aligned}$$

Э. д. с. управляющей обмотки равна

$$\dot{E}_y = j x_{af_2} [\dot{I}_A \cos \gamma_2 + \dot{I}_B \cos (\gamma_2 - 120^\circ) + \dot{I}_C \cos (\gamma_2 + 120^\circ)].$$

Подставляя сюда полученные выражения для токов, будем иметь:

$$\begin{aligned}\dot{E}_y &= -j \frac{3}{2} x_{af_2} \frac{\dot{E}_\Phi}{\dot{z}} \left[\left(1 - \frac{1}{3} \frac{\Delta \dot{z}}{\dot{z}} \right) \cos (\gamma_1 - \gamma_2) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{3} \frac{\Delta \dot{z}}{\dot{z}} \cos (\gamma_1 + \gamma_2) \right].\end{aligned}$$

Заменяя в этом выражении $\gamma_1 - \gamma_2 = \frac{\pi}{2} + \beta$, окончательно получим:

$$\begin{aligned}\dot{E}_y &= j \frac{3}{2} x_{af_2} \frac{\dot{E}_\Phi}{\dot{z}} \left[\left(1 - \frac{1}{3} \frac{\Delta \dot{z}}{\dot{z}} \right) \sin \beta - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{3} \frac{\Delta \dot{z}}{\dot{z}} \sin (\beta + 2\gamma_2) \right].\end{aligned}\quad (31.33)$$

Отсюда следует, что отклонение параметра фазы селсина-приемника на величину $\Delta \dot{z}$ от его номинального значения приводит к появлению статической ошибки, изменяющейся с двойной периодичностью от угла поворота ротора приемника.

Полное сопротивление фазных цепей датчика и приемника $\dot{z}$ имеет преимущественно индуктивный характер $\dot{z} \approx jx$. Поэтому, если $\Delta \dot{z} = j \Delta x$ (неравенство индуктивных сопротивлений фаз), то ошибка в управляющей э. д. с. ΔE_y , как видно из формулы (31.33), совпадает по фазе с основным сигналом. Это приводит к появлению статической ошибки, величина которой может быть подсчитана по формуле

$$\Delta \beta^\circ = -57,3 \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{\Delta x}{x} \sin 2\gamma_2. \quad (31.34)$$

Если же $\Delta \dot{z} = r$ (неравенство активных сопротивлений), то ошибка в управляющей э. д. с. ΔE_y сдвинута по фазе на 90°

от основного сигнала и в меньшей степени сказывается на статической ошибке трансформаторного селсина-приемника.

Точно так же двукратную периодичность от угла поворота имеют статические ошибки от неравномерного воздушного зазора и эксцентricности расположения ротора и статора селсина.

Таким образом, можно сформулировать следующий вывод.

Статические ошибки трансформаторной синхронной передачи, обусловленные несинусоидальностью распределения обмоток, имеют периодичность, кратную шести. Для их уменьшения необходимо перейти на другое укорочение шага обмотки или изменить значение полюсной дуги (для явнополюсных приемников).

Статические ошибки от неточности изготовления (технологические ошибки) имеют периодичность, кратную двум. Для их уменьшения должны быть предусмотрены технологические мероприятия с целью обеспечить изготовление симметричного селсина.

По кривой статических ошибок, снятой экспериментальным путем, можно судить, какой вид ошибок имеет место в данной трансформаторной синхронной передаче.

Глава VI

КОНСТРУКЦИЯ СЕЛСИНОВ

§ 32. СРАВНЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ КОНТАКТНЫХ СЕЛСИНОВ

Основным требованием, предъявляющимся к конструкциям селсинов, является обеспечение максимальной статической и динамической точности синхронной передачи. Как уже говорилось в IV главе, этому требованию удовлетворяют такие селсинны-приемники, у которых большой удельный момент, малые моменты трения и реактивный момент и т. д. Для увеличения удельного синхронизирующего момента и уменьшения реактивных моментов магнитной цепи селсинов приходится придавать особую конфигурацию, отличную от конфигурации магнитной цепи других электрических машин. С целью получить минимальный момент трения в селсинах применяются легкие щеточные устройства и шарикоподшипники, обладающие большой легкостью хода.

Селсины по своей конструкции отличаются от других электрических машин, хотя имеют много общего с ними. Конструктивно селсины могут выполняться как явнополюсные, так и неявнополюсные машины. Первые из них напоминают синхронные явнополюсные машины, а вторые — асинхронные машины с фазным ротором.

Имеется несколько конструкций контактных селсинов, отличающихся друг от друга по расположению обмоток возбуждения и синхронизации, а также по устройству магнитной цепи. Селсины разных конструктивных форм отличаются друг от друга следующими основными особенностями:

1. Статор имеет явно выраженные полюса, на которых размещается обмотка возбуждения. Ротор имеет равномерно распределенные по окружности пазы, в которые укладывается трехфазная обмотка синхронизации. На роторе устанавливаются три контактных кольца для вывода концов обмотки синхронизации.

2. Статор имеет распределенные по окружности пазы, в которые укладывается трехфазная обмотка синхронизации. Ротор имеет явно выраженные полюса, на которых размещается обмотка возбуждения. На оси ротора устанавливаются два контактных кольца для вывода концов обмотки возбуждения.

3. Пазы статора и ротора распределены по окружности. Обмотка возбуждения уложена в пазах ротора, а обмотка синхронизации — в пазах статора. На оси ротора устанавливаются два контактных кольца для вывода концов обмотки возбуждения.

Принципиально возможен и такой неявнополюсный селсин с распределенными пазами и на роторе и на статоре, у которого обмотка возбуждения расположена на статоре, а синхронизирующая обмотка — на роторе. Однако на практике эта конструктивная форма не применяется. Первоначально наибольшее распространение имели явнополюсные селсины с обмоткой возбуждения на статоре. Но впоследствии с развитием науки и накоплением практического опыта наибольшее распространение получили селсины второй и третьей конструктивных форм.

Рассмотрим основные преимущества и недостатки различных конструктивных форм селсинов. Как было сказано выше, селсины отличаются друг от друга расположением обмоток возбуждения и синхронизации, а также конфигурацией магнитной цепи.

В селсинах с обмоткой возбуждения на статоре:

а) сопротивление переходных контактов включено в цепь обмотки синхронизации, и его изменения вносят ошибку в работу синхронной передачи;

б) даже кратковременная неисправность любого из трех контактов вызывает нарушение работы синхронной передачи;

в) в цепи каждого из контактов действует напряжение, изменяющееся в зависимости от положения ротора; при малых напряжениях увеличивается вероятность потери контакта;

г) имеется сравнительно большой момент трения, обусловленный наличием трех контактных колец;

д) невозможно установить демпферную обмотку, а поэтому, как правило, малый удельный синхронизирующий момент;

е) необходимо установить механический демпфер для гашения колебаний ротора, что усложняет конструкцию селсина и увеличивает его динамические ошибки.

В селсинах с обмоткой возбуждения на роторе:

а) переходные сопротивления контактов включены в цепь обмотки возбуждения и их изменения совершенно не влияют на точность работы синхронной передачи;

б) наличие только двух контактных колец, в связи с чем меньший момент трения;

в) даже длительная потеря контакта у одного из селсинов после самосинхронизации системы не ведет к прямому нарушению работы синхронной передачи, а только несколько увеличивает ее ошибки; селсины при потере контакта работают как реактивные электродвигатели;

г) в цепи контактов действует достаточно большое напря-

жение сети и уменьшается вероятность потери контакта, так как напряжение сети всегда будет пробивать небольшие изоляционные пленки, которые могут появиться вследствие коррозии;

д) возможно простое конструктивное осуществление демпферной обмотки, что позволяет получить сравнительно большие значения удельного синхронизирующего и демпферного моментов; вследствие этого возможно исключить механический демпфер, так как гашение колебаний ротора обеспечивается демпферной обмоткой.

Из сказанного видно, что селсины, у которых обмотки возбуждения помещены на роторе, имеют значительные преимущества перед селсинами с обмоткой возбуждения, расположенной на статоре. К недостаткам селсинов с обмоткой возбуждения на роторе следует отнести только то, что через их щетки постоянно проходит ток возбуждения, в то время, как в селсинах с обмоткой возбуждения на статоре значительные токи проходят через щетки только в моменты согласования. Однако, учитывая, что селсины обычно потребляют токи, не превышающие нескольких ампер, этот недостаток можно считать несущественным. Поэтому в отношении расположения обмоток следует давать предпочтение таким селсинам, у которых обмотка возбуждения расположена на роторе.

Рассмотрим преимущества и недостатки явнополюсной и неявнополюсной формы магнитной цепи селсинов.

Из формулы (12.4) следует, что удельный синхронизирующий момент равен $m_0 = k \frac{E_\Phi^2}{z_q}$ или, учитывая, что $E_\Phi \equiv \Phi_d$,

$$m_0 = k_1 \frac{\Phi_d^2}{z_q}.$$

Как видим, для увеличения удельного момента необходимо в свою очередь увеличить продольный поток и уменьшить поперечное реактивное сопротивление селсина. Для этого очевидно необходимо обеспечить максимальную проводимость продольному потоку и минимальную проводимость поперечному потоку. Для данной цели необходимо применять селсины с явновыраженными полюсами, а демпферную обмотку помещать в поперечной оси. В селсинах второй конструктивной формы выполняют и то и другое; в селсинах третьей конструктивной формы — только последнее мероприятие. Вопрос применять ли одновременно явновыраженные полюса и демпферную обмотку или же ограничиться только демпферной обмоткой решается в зависимости от размеров селсина и частоты питающей сети. При повышенной частоте тока демпферная обмотка больших селсинов достаточно эффективна и нет надобности прибегать к явновыраженным полю-

сам, так как наличие их вызывает краевой эффект и дополнительный реактивный момент. В малых селсинах при нормальной частоте (50 гц) демпферная обмотка весьма часто не обеспечивает получение необходимых параметров поперечной цепи, вследствие чего приходится делать явно выраженные полюса. Недостаточная эффективность демпферной обмотки в этом случае объясняется тем, что чем меньше размеры витка, его поперечное сечение и частота, тем ниже добротность витка. Демпферные обмотки с витками небольших размеров имеют такое сопротивление, которое значительно превышает сопротивление, необходимое для получения достаточного удельного момента.

Подытожим сказанное выше: неявнополюсная форма магнитной цепи является наиболее благоприятной для селсинов, так как при этом исключается краевой эффект полюсов, имеющий место в явнополюсных селсинах, и появляется возможность уменьшить реактивные моменты до минимальной величины. Поэтому в тех случаях, когда имеется возможность получить требуемые параметры демпферной обмотки, следует выбирать неявнополюсную форму магнитной цепи; когда же нет возможности обеспечить необходимые параметры демпферной обмотки при неявнополюсной форме магнитной цепи, следует выполнять селсин с явновыраженными полюсами, принимая все меры для уменьшения краевого эффекта.

Итак:

а) первая конструктивная форма селсинов с явновыраженными полюсами на статоре является нерациональной и ее следует избегать;

б) вторая конструктивная форма селсинов с обмоткой возбуждения на явновыраженных полюсах ротора и третья конструктивная форма селсинов с обмоткой возбуждения на неявнополюсном роторе обеспечивают получение хороших эксплуатационных данных, а поэтому и являются более рациональными, чем первая конструктивная форма;

в) выбор между второй и третьей конструктивной формой селсинов следует производить в зависимости от размеров селсина и частоты питающей сети.

§ 33. КОНСТРУКЦИЯ КОНТАКТНЫХ СЕЛСИНОВ

А. Устройство магнитной цепи

На рис. 116 показано устройство магнитной цепи селсина, имеющего первую конструктивную форму. Статор его состоит из кольцеобразного ярма и двух явновыраженных полюсов. Чаще всего ярмо и полюса представляют одно целое. Однако в этом случае затрудняется посадка катушек обмотки

возбуждения. Поэтому в некоторых случаях для облегчения посадки катушек возбуждения делают разъемные полюса. Наличие таких полюсов усложняет конструкцию селсина и вызывает трудности при сборке полюсов и ярма. Кроме того, в данной конструкции неизбежно возникают дополнительные воздушные зазоры между полюсами и ярмом, что приводит к увеличению тока холостого хода селсина. По указанным

причинам следует отдать предпочтение конструкции статора с неразъемными полюсами.

Как было сказано выше, для получения достаточного удельного момента в селсинах необходимо обеспечить максимальную магнитную проводимость по продольной оси и минимальную магнитную проводимость по поперечной оси.

Для этого в селсинах первой конструктивной формы центр полюсной дуги O_1 смещают относительно центра ротора O на величину m (рис. 116). При этом воздушный зазор под полюсом делается переменным: под серединой полюса зазор минимальный, а по мере удаления к краям увеличивается. Максимальный зазор может быть больше минимального в десять и более раз.

На рис. 117, а показано распределение продольного и поперечного потоков при равномерном зазоре. Как Φ_d , так и Φ_q распределяются в пределах полюсной дуги по синусоидальному закону. Однако, если Φ_d в центре дуги имеет точку с максимальной индукцией, то Φ_q в том же месте имеет точку с нулевой индукцией. На рис. 117, б показано распределение продольного и поперечного потоков при неравномерном зазоре, при $\delta_{\max} = 10\delta_{\min}$.

Сравнивая эти два рисунка, нетрудно видеть, что при неравномерном зазоре поперечный поток уменьшается весьма резко, а продольный поток сравнительно мало.

Кроме изменения отношения Φ_d/Φ_q , эксцентричное расположение полюсной дуги обеспечивает уменьшение краевого эффекта явно выраженных полюсов, так как по краям полюсов поток возбуждения оказывается сильно ослабленным. Следует указать, что улучшение параметров селсина посредством устройства эксцентричной полюсной дуги не всегда достигает цели, так как одновременно с уменьшением поперечного потока несколько уменьшается и продольный поток.

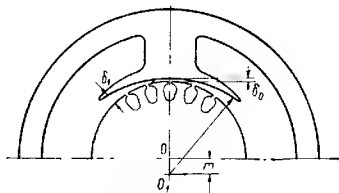


Рис. 116. Магнитная цепь контактного селсина первой конструктивной формы.

параллельной работе нескольких селсинов неисправность щеточного устройства (хотя бы одного из них) может нарушить работу не только этого селсина, но и всей синхронной передачи. Например, при коротком замыкании щеток любого приемника выходит из строя вся система синхронной передачи. Отсюда понятно, почему большое значение придается надежности щеточного устройства селсинов.

В селсинах-приемниках к контактным кольцам и щеткам предъявляются следующие основные требования:

1. Щеточное устройство в условиях длительной эксплуатации должно обеспечивать надежный контакт при изменении температуры, при повышенной влажности, при вибрации, тряске и т. д.

2. Щеточное устройство должно создавать незначительный момент трения.

Как уже было сказано ранее, это требование обусловлено тем, что в синхронном положении вращающий момент на оси приемника равен нулю, и даже самый маленький момент трения вызывает ошибку синхронной передачи. Очевидно, для уменьшения величины ошибки необходимо ограничить суммарный момент трения на оси приемника, а следовательно, и момент трения, создаваемый щетками.

Указанные два требования взаимно исключают друг друга, так как для обеспечения надежного контакта при этих условиях работы необходимо иметь значительные давления на щетках, что вызывает увеличение момента трения на оси ротора селсина. Поэтому при проектировании щеточного устройства контактных селсинов-приемников для обеспечения в достаточной степени таких качеств, как точность селсина, его надежность в работе, приходится иногда принимать компромиссное решение.

К щеточному устройству селсинов-датчиков предъявляется, в основном, требование обеспечивать надежность контакта. Минимальный же момент трения для датчиков не имеет существенного значения, так как они вращаются принудительно.

В зависимости от условий работы и размеров селсинов применяются разнообразные конструкции щеточных устройств. Как правило, в селсинах щеточное устройство совмещается с клеммной платой. Непосредственная установка щеток на клеммной плате позволяет максимально упростить конструкцию селсина и полностью исключить монтажные проводники, соединяющие щетки с выводными клеммами.

Несмотря на многообразие конструктивных форм, щеточные устройства селсинов могут быть подразделены на две группы: бесшарнирные и шарнирные.

В бесшарнирных щеточных устройствах рабочее давление на щетку создается за счет упругой деформации контактной пластины, несущей щетку. В шарнирных щеточных устройствах

щетка прикрепляется к жесткой пластине, поворачивающейся на шарнире, а контактное давление создается специальной, чаще всего цилиндрической пружиной.

На рис. 120 показано бесшарнирное щеточное устройство с двумя парами щёток для селсина второй конструктивной формы. К изоляционной плате 1 с верхней стороны прикреплены при помощи винтов две латунные пластины 2, к каждой из которых в свою очередь прикрепляются при помощи двух винтов 3 наружная П-образная скоба 4, контактная пластина 5

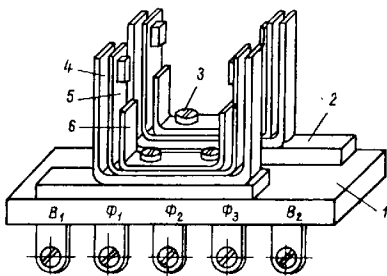


Рис. 120. Бесшарнирное щеточное устройство.

и внутренняя П-образная скоба 6. Наружная и внутренняя П-образные скобы служат для защиты контактной пластины от повреждения при изготовлении и при эксплуатации селсинов. Контактная пластина изготавливается из хорошо пружинящей бронзы толщиной 0,1—0,5 мм. Щетки прикрепляются к контактной пластине посредством клепки или пайки. К нижней стороне изоляционной платы 1 прикрепляются клеммы B_1 , B_2 , которые служат для вывода концов обмотки возбуждения, и клеммы Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 для вывода концов обмотки синхронизации. Каждая из клемм B_1 и B_2 соответственно присоединяется к одной из латунных пластин 2 при помощи винтов, проходящих через изоляционную плату.

На рис. 121 показано шарнирное щеточное устройство для селсинов второй конструктивной формы с двумя контактными кольцами. На изоляционной плате 1 с верхней стороны прикреплены при помощи винтов две латунные пластины 2, имеющие на концах выступы, разрезанные на две части. В эти разрезы входят концы рычагов 3, вращающихся на осях 4, укрепленных на выступах латунных пластин 2. В верхней части рычагов 3 помещаются щетки 5.

Рычаги 3 в нижней части имеют отверстие для крепления концов цилиндрических пружин 6, которые создают необходимое контактное давление; в верхней части рычаги имеют отверстия для облегчения измерения давления при помощи граммометра. С нижней стороны изоляционной платы помещаются клеммы для вывода концов обмоток. Клеммы B_1 и B_2 , соответственно, присоединяются к латунным пластинам 2 при помощи винтов, проходящих через изоляционную плату. Так как электрический контакт через шарнир ненадежен, обычно

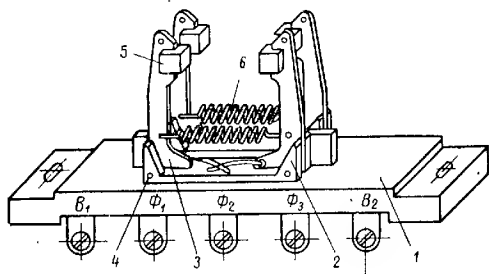


Рис. 121. Шарнирное щеточное устройство с двумя контактными кольцами.

латунные пластины 2 и рычагам 3 соединяются гибким проводником (канителькой), один конец которого припаивается к рычагам 3, а другой к пластине 2.

Шарнирные и бесшарнирные щеточные устройства с тремя контактными кольцами по своей конструкции аналогичны вышеописанным щеточным устройствам.

Во всех перечисленных устройствах для увеличения надежности работы установлены две щетки на каждое контактное кольцо. Однако, на практике иногда встречаются селсины малых габаритов с одной щеткой на контактное кольцо.

Преимуществом бесшарнирных щеточных устройств является простота конструкции, надежность в эксплуатации благодаря отсутствию вращающихся частей, а недостатком — трудность регулирования давления.

Шарнирные щеточные устройства позволяют легко регулировать давление. Недостатком же их является сложность конструкции, меньшая надежность в эксплуатации из-за возможности затирания шарнира и меньшая вибро- и ударостойкость из-за возможности соприкосновения между собой цилиндрических пружин.

Как было показано выше, к щеточным устройствам, в целом предъявляется требование, чтобы они создавали минимальный момент трения. Величина этого момента равна

$$M_t = k_t \cdot n \cdot P \cdot D,$$

где k_t — коэффициент трения, зависящий от материала контактных колец и щеток;

n — количество щеток;

P — давление одной щетки;

D — диаметр контактных колец.

Из формулы видно, что для уменьшения момента трения необходимо, в частности, уменьшать диаметр контактных колец до минимально возможной величины. Это требование, по существу, и определяет конструкцию контактных колец селсинов. Следует учитывать, что при уменьшении диаметра контактных колец неизбежно уменьшится механическая прочность ротора, а также электрическая прочность контактных колец. Уменьшение механической и электрической прочности вызвано в данном случае тем, что для уменьшения диаметра контактных колец уменьшают диаметр вала, на который они насаживаются, и сокращают изоляционные промежутки между валом и контактными кольцами. Следовательно, при конструировании контактных колец главное внимание следует обратить на то, чтобы кольца при возможно малом диаметре имели достаточную электрическую прочность и позволяли применять оси необходимой механической прочности.

По конструкции контактные кольца могут быть подразделены на две группы: сборные и цельнопрессованные. Сборные контактные кольца состоят из отдельных изоляционных и токопроводящих деталей, которые склеиваются между собой. Сборка контактных колец производится как непосредственно на оси селсина, так и на отдельной изоляционной втулке. В цельнопрессованных контактных кольцах все токопроводящие детали помещаются в прессформу и опрессовываются пластмассой.

На рис. 122 показано устройство сборных контактных колец, собирающихся на отдельной втулке. Контактные кольца состоят из изоляционной втулки 1, на которую последовательно насаживают контактное кольцо 2, изоляционное кольцо 3 с выступающей частью, служащей для предотвращения попадания щетки с одного кольца на другое, контактное кольцо 4 и ограничивающую изоляционную втулку 5. Выводные проводники 7 от контактных колец проходят через канавки во втулке 1. Во избежание замыкания выводного проводника от контактного кольца 2 к контактному кольцу 4 укладывается изоляционная прокладка 6. Перед сборкой все детали в местах сопряжения смазываются склеивающим веществом (бакелитовый лак, клей БФ), а после сборки контактные

кольца запекаются, вследствие чего приобретают необходимую механическую прочность. На рис. 123 показано устройство сборных контактных колец, собирающихся непосредственно на оси селсина. Контактные кольца состоят из трех изоляционных колец 2 и двух контактных колец 3, устанавливаемых

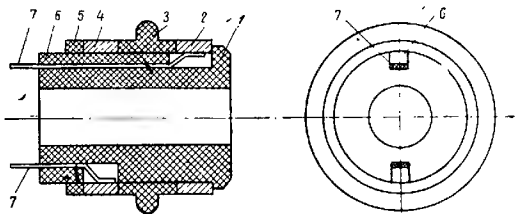


Рис. 122. Устройство сборных контактных колец, собирающихся на отдельной втулке.

поочередно на оси 1. Выводные концы от контактных колец проходят через два отверстия в изоляционных кольцах 2.

Основным преимуществом этих контактных колец по сравнению с кольцами, собирающимися на отдельной втулке

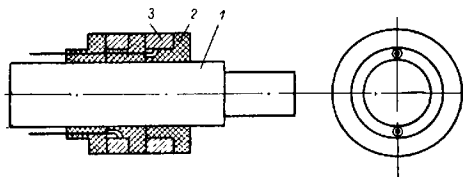


Рис. 123. Устройство сборных контактных колец, собирающихся непосредственно на оси селсина.

(рис. 122), является возможность уменьшить диаметр их, а недостатком — меньшая электрическая прочность изоляции относительно корпуса.

На рис. 124 схематически показано устройство цельнопрессованных контактных колец. Оно состоит из контактного кольца 1 с отводом 4, контактного кольца 2 с отводом 5 и изоляционной трубки 3. Детали устанавливаются в прессформу и опрессовываются пластмассой. Изоляционная трубка 3 служит для предотвращения замыкания отвода 4 с кольцом 2 во время опрессовки пластмассой.

Цельнопрессованные контактные кольца более совершенны, чем сборные, так как они могут обеспечить получение минимального диаметра контактных колец при их высокой электрической прочности.

При изготовлении контактных колец для селсинов и, особенно, для селсинов с обмоткой возбуждения на роторе, следует обращать серьезное внимание на электрическую прочность их, так как при выключении системы на кольцах

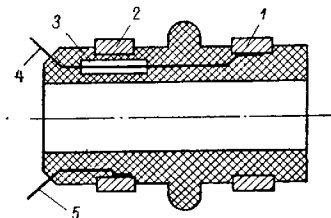


Рис. 124. Устройство цельнопрессованных контактных колец.

возникают импульсы перенапряжения, которые превышают номинальные напряжения в десять и более раз. Поэтому контактные кольца селсинов должны при проверке выдерживать испытательное напряжение не менее чем в 15 раз больше номинального. Это относится к селсинам, рассчитанным на номинальную частоту (50 гц). У селсинов, предназначенных для

работы на повышенной частоте, перенапряжения значительно меньшие, поэтому и испытательные напряжения для них могут быть взяты также меньшими.

Как правило, контактные кольца помещаются внутри селсина со стороны крышки, на которой находится клеммная плата. Для осмотра контактных колец и щеточного устройства, а также для ухода за ними на крышке делаются смотровые окна или крышка делается открытой. Иногда контактные кольца располагают за крышкой селсина на выступающем конце оси, что облегчает осмотр щеточного устройства и уход за ним. Однако при этом усложняется конструкция селсина, так как концы от обмотки ротора приходится проводить к контактным кольцам через внутреннее отверстие шарикоподшипника.

На рис. 125 показано устройство вынесенных контактных колец. В этом случае приходится сильно увеличивать диаметр шарикоподшипника, что неизбежно ведет к увеличению момента трения.

Очень редко встречаются такие селсины с обмоткой возбуждения на роторе, у которых контактные кольца разнесены по обе стороны его, т. е. одно контактное кольцо расположено с одной стороны ротора, а другое — с другой стороны. Такое расположение контактных колец, хотя и исключает возможность электрического пробоя между ними, но значительно усложняет конструкцию самого селсина, сильно затрудняет

осмотр его и уход за щетками. Поэтому такую конструкцию едва ли можно считать оправданной, так как достаточную электрическую прочность изоляции между кольцами можно создать, и не разнося кольца по обе стороны ротора.

Надежная работа щеточного устройства в сильной степени зависит и от того, из каких материалов изготовлена контактная пара. К контактной паре селсинов предъявляются следующие основные требования:

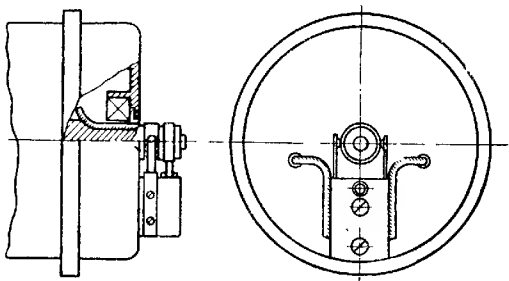


Рис. 125. Устройство вынесенных контактных колец.

а) она должна обеспечивать при минимальном давлении надежный контакт при изменении температуры в широком пределе и повышенной влажности;

б) должна обладать минимальным и неизменным коэффициентом трения и мало стираться;

в) иметь минимальное переходное сопротивление.

Первые два требования имеют существенное значение для всех селсинов, а третье — важно лишь для селсинов первого конструктивного типа, у которых переходный контакт включается в цепь обмотки синхронизации.

Контактные пары для селсинов делаются из двух разных материалов, контактные кольца — из одного материала, а щетки — из другого; обычно применяются такие сочетания материалов: бронза — серебро, никель — серебро, никель — меднографит, аргодур — меднографит, аргодур — серебрографит. Первым здесь назван материал для контактных колец, а вторым — для щеток.

Контактные кольца и щетки, изготовленные из двух разных металлов, обычно создают сравнительно большой, нестабильный момент трения, а кроме того, они подвержены значительному износу. У селсинов, имеющих как кольца, так и щетки из металла, при работе в динамическом режиме

увеличивается момент трения, а в результате износа контактных колец и щеток внутри селсинов осаждается мелкая металлическая пыль, что приводит при недостаточном уходе к уменьшению сопротивления изоляции или пробое изоляции.

Селсины с кольцами из металла и со щетками из медно-графитной или из серебруграфитной композиции обладают сравнительно небольшим и стабильным моментом трения: при эксплуатации их щетки и кольца почти не подвержены износу. Выбор контактной пары зависит от условий, при которых работают селсины — температуры окружающей среды, влажности, скорости вращения и т. д.

В. Механические демпферы

Для гашения колебаний ротора селсина, возникающих при согласовании системы синхронной передачи, во всех случаях, когда невозможно получить электрическое демпфирование, применяются механические демпферы. Как было сказано в § 6, необходимость установки демпфера определяется знаком коэффициента демпфирования T_D . Если $T_D > 0$, то селсины не нуждаются в установке механического демпфера, а если $T_D < 0$, то необходимо установить такой демпфер.

Основными элементами любого механического демпфера являются маховая масса и фрикционное устройство. Маховая масса помещается на оси ротора так, чтобы обеспечивался ее поворот относительно оси с некоторым моментом трения, создаваемым фрикционным устройством. Принцип действия механического демпфера весьма прост и заключается в следующем: при возникновении колебаний маховая масса вследствие большой инерции остается почти неподвижной, и на оси селсина появляется дополнительный момент трения, возникающий вследствие поворота оси относительно маховой массы. На преодоление дополнительного момента трения, возникающего в демпфере, расходуется часть кинетической энергии движущегося ротора, что ведет к быстрому затуханию его колебаний.

На рис. 126 представлен общий вид механического ртутного демпфера, состоящего из корпуса 1, крышки 2, двух перегородок 3, установленных внутри корпуса, и ртути, заполняющей корпус. Корпус 1 в центральной части имеет втулку с отверстием для насаживания демпфера на ось селсина, а со стороны, противоположной втулке, глубокую выточку. Крышка 2 вставляется в отверстие корпуса и закрепляется посредством развальцовки корпуса по наружному и внутреннему диаметрам. Между корпусом и крышкой помещаются перегородки 3 с отверстиями 4. В корпусе имеются два отверстия, через которые он заполняется ртутью. Эти отверстия закры-

ваются винтами 5. При колебаниях ротора селсина ртуть через отверстия в перегородке переливается из одной полости корпуса в другую. В результате трения ртути о стенки перегородки и корпуса возникает необходимый демпфирующий момент на оси селсина. Следовательно, в данном демпфере маховой массой является ртуть, а фрикционным устройством — перегородки, стенки корпуса и крышки.

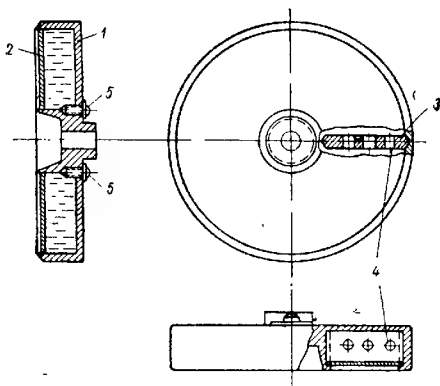


Рис. 126. Общий вид механического ртутного демпфера.

Ртутный демпфер обладает рядом существенных недостатков: большой вес, сложность конструкции вследствие необходимости обеспечивать герметичность корпуса во избежание вытекания ртути, ненадежность в работе. Из-за этих недостатков ртутные демпферы в настоящее время не применяются и могут встретиться только в старых типах селсинов.

На рис. 127 показан механический демпфер со спиральной пружиной. Демпфер состоит из втулки 1, жестко насаживаемой на ось селсина, корпуса 2, свободно вращающегося на втулке 1, и спиральной пружины 3, изготовленной из ленточной стали. Наружный конец спиральной пружины жестко прикрепляется к корпусу 2, а внутренний конец обхватывает втулку 1 по наружному диаметру. При повороте оси ротора в одну сторону пружина сжимается и заводится на некоторый угол, а при повороте в другую сторону — раскручивается, и внутренний конец пружины и втулка поворачиваются относительно пружины с некоторым моментом трения.

Недостатками этого демпфера является то, что он работает только в одну сторону и затруднена регулировка момента трения между пружиной и втулкой.

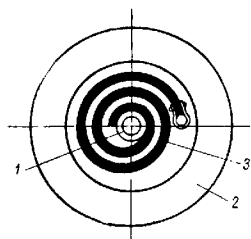


Рис. 127. Механический демпфер со спиральной пружиной.

Механические демпферы со спиральной пружиной широко применялись в заграичных образцах селсинов.

На рис. 128 показан двухступенчатый фрикционно-инерционный демпфер¹. Демпфер состоит из следующих основных частей: втулки 1, махового колеса 2 и фрикционного устройства 4, 5. Втулка 1 жестко насаживается на ось селсина. На втулке свободно вращается маховое колесо 2, продольные перемещения которого ограничиваются стопорным пружинным

кольцом 3, помещающимся в полукруглой канавке. Втулка 1 спереди имеет форму шкива с канавкой на ободу, в которой помещается фрикционное устройство, состоящее из пружины 4 и зажима 5. Пружина 4 изготавливается из стальной прово-

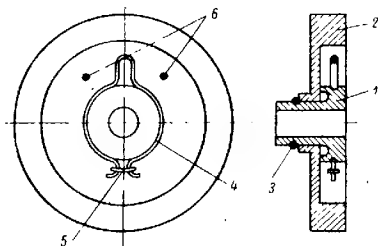


Рис. 128. Двухступенчатый фрикционно-инерционный демпфер.

локи; она состоит из трех частей: выступающей носовой, средней, имеющей форму окружности, и хвостовой части. На маховике 2 укреплены два штифта 6, о которые при поворотах упирается носовая часть пружины фрикционного устройства.

¹ Демпфер предложен инженером Д. П. Мкртчяном и впервые применен в контактных селсинах СС-500 и ДС-500 в 1941 г.

Для выяснения действия демпфера предположим, что маховое колесо неподвижно, а втулка 1 вращается. Рассмотрим момент трения, возникающий между ними. При повороте втулки на угол $\pm \frac{\alpha}{2}$, где α — угол между штифтами, будет действовать только момент трения между втулкой 1 и маховиком 2, величина которого определяется весом маховика, диаметром втулки и коэффициентом трения. При поворотах втулки на углы, большие чем $\pm \frac{\alpha}{2}$, иловая часть пружины 4 будет упираться в штифты, и для поворота втулки потребуется преодолеть, кроме момента трения маховика, еще момент трения, возникающий в фрикционном устройстве между пружиной 4 и втулкой 1.

На рис. 129 показана зависимость момента трения двухступенчатого демпфера от угла поворота. Как видно из рисунка, демпфер имеет две ступени демпфирования; в первой ступени

(в пределах $\pm \frac{\alpha}{2}$) действует момент трения M_1 , а во второй ступени (при углах больших $\frac{\alpha}{2}$) — момент M_2 . Момент трения M_1 не поддается регулировке, момент M_2 можно легко изменить за счет выгибания иловой части пружины 4. Наличие двухступенчатого демпфирования обеспечивает быстрое затухание колебаний роторов селсинов. На рис. 130 приведены кривые затухания колебаний ротора селсина СС-500 при наличии ртутного демпфера и двухступенчатого фрикционно-инерционного демпфера. Как видно из рисунка, второй демпфер действует значительно более эффективно, чем первый. Соответственно подбирая маховую массу, угол α и момент M_2 , можно всегда добиться при демпфировании хороших результатов.

Основными преимуществами двухступенчатого демпфера следует считать: большую эффективность демпфирования, незначительный вес, простоту и надежность конструкции, возможность регулировки и проверки момента трения.

Если соответствующим образом подобрать параметры механического демпфера, то он дает хорошие результаты в работе.

Селсины с механическим демпфером не впадают в асинхронный ход и успокаиваются при согласовании в течение нескольких секунд. Однако, в динамическом режиме при неравномерном вращении оси датчика, механические демпферы

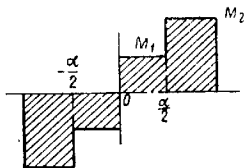


Рис. 129. Кривая момента трения двухступенчатого демпфера.

ухудшают работу селсинов приемников. Так, например, при вращении оси датчика со скоростью, изменяющейся по синусоидальному закону, на оси ротора приемника возникнут ускорения, изменяющиеся по косинусоидальному закону. При наличии ускорений механический демпфер будет создавать дополнительный момент трения на оси приемника, что вызовет дополнительную ошибку.

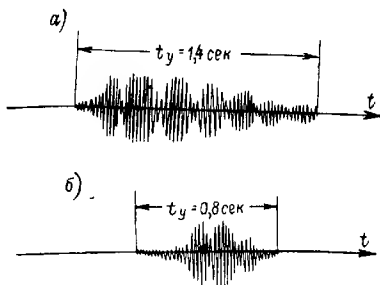


Рис. 130. Кривые затухания колебаний селсина СС-500: а — с ртутным демпфером; б — с двухступенчатым фрикционно-инерционным демпфером.

Обычно угловые ускорения на оси датчика невелики и дополнительная ошибка, создаваемая механическим демпфером, незначительна. Поэтому селсины с механическими демпферами нашли широкое применение.

Г. Электрический демпфер

Как уже говорилось выше, демпферная обмотка, устанавливаемая в поперечной оси селсинов, имеет двойное назначение: а) получение параметров селсинов по поперечной оси, при которых возникает максимальный удельный момент; б) обеспечение электрического демпфирования колебаний ротора. Поэтому параметры демпферной обмотки подбираются так, чтобы наилучшим образом выполнить эти задачи. Демпферные обмотки селсинов по своей конструкции резко отличаются от демпферных обмоток, применяемых в синхронных машинах. В последних, как известно, эта обмотка состоит из ряда стержней, которые соединяются вместе с двух сторон или в пределах одного полюса, образуя неполную „беличью клетку“, или по всей окружности, образуя полную „беличью клетку“. Подобные демпферные обмотки замкнуты как по продольной,

так и по поперечной осям. Применять такие демпферные обмотки в селсинах нельзя, так как они при работе гасят поток обмотки возбуждения. Демпферные обмотки в селсинах должны иметь направленное действие, чтобы они не влияли на поток обмотки возбуждения и гасили поперечный магнитный поток. Это может быть достигнуто, если ось их совпадает с поперечной осью селсина.

На рис. 131, *а* показан ротор селсина с демпферной обмоткой, состоящей из двух короткозамкнутых витков, изолированных друг от друга; на рис. 131, *б* отдельно показана эта

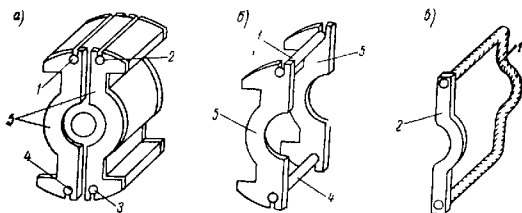


Рис. 131. Ротор селсина с демпферной обмоткой.

обмотка. В пазах ротора помещаются четыре медных круглых стержня, которые изолируются от пакета стали ротора при помощи прессшпана или лакоткани. Стержни 1, 4 и 2, 3 между собой соединяются попарно при помощи медных пластины 5. Последние также изолированы от пакета стали при помощи пластин, изготовленных из изоляционного материала, например, из прессшпана или гетинакса. Стержни и медные пластины соединяются между собой пайкой, которая, кроме механической прочности, должна обеспечить хороший электрический контакт. Как видно из рисунка 131, *б*, в каждом короткозамкнутом витке при этой конструкции получается четыре переходных контакта.

С целью уменьшить число переходных контактов применяется конструкция демпферной обмотки, показанная на рис. 131 *в*. Каждый виток ее состоит из П-образной части 1, которая выгибается из круглого медного стержня, и замыкающей перемычки 2. Здесь каждый виток имеет два переходных контакта. Демпферные обмотки последней конструкции удобны в изготовлении только при малом диаметре стержней; при большом же диаметре стержня более удобна первая конструкция обмотки, так как нет необходимости изгибать стержни.

У селсинов с обмоткой возбуждения на неявнополюсном роторе демпферная обмотка состоит из большого количества витков, которые помещаются в пазах. Обычно, демпферная обмотка наматывается из провода такого же диаметра, что и обмотка возбуждения. Вообще говоря, на ротор можно намотать две однофазные обмотки, оси которых смещены на 90 электрических градусов. Одна из этих обмоток при включении в сеть может выполнить роль обмотки возбуждения, а вторая, будучи замкнутой, роль демпферной обмотки. Однако, лучшие результаты можно получить при использовании схемы соединения обмоток ротора, изображенной на рис. 132, а.

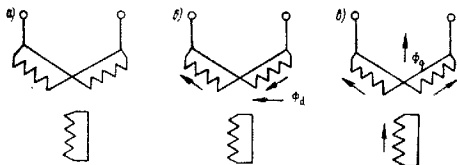


Рис. 132. Электрическая схема ротора неявнополюсного селсина с демпферной обмоткой: а — схема соединения обмоток ротора; б — направление э. д. с. от продольного потока; в — направление э. д. с. от поперечного потока.

Роторная обмотка представляет собой обычную трехфазную обмотку, две фазы которой включены параллельно, а третья — замкнута. Достоинство этой схемы в том, что здесь роль демпферной обмотки выполняет не только замкнутая фаза, но и остальные две фазы, включенные параллельно и принципиально выполняющие роль обмотки возбуждения.

На рис. 132, б, в стрелками показано направление э. д. с., индуцируемых в обмотках продольными и поперечными полями. Как видно из рисунков, э. д. с., индуцируемые в параллельно включенных фазах поперечным полем, складываются по контуру и вызывают протекание токов, а э. д. с., индуцируемые продольным полем, направлены навстречу и взаимно компенсируются. Отсюда можно сделать вывод, что поперечный поток будет воздействовать не только на замкнутую фазу, но и на остальные две фазы, включенные параллельно.

Д. Контактный селсин-приемник СС-404

Селсин СС-404 (рис. 133) является селсином первого конструктивного типа. Явно выраженные полюса I собираются из пластин электротехнической стали толщиной 0,5 мм и скрепляются при помощи заклепок, устанавливаемых по центру

полюсов. Полюсная дуга имеет эксцентриситет относительно оси ротора, а воздушный зазор под полюсом имеет переменную величину. Минимальная величина зазора по центру полюсов равна 0,2 мм. На полюса 1 насаживаются катушки возбуждения 2, которые предварительно наматываются на шаблоне и изолируются лентой. Полюса с катушкой возбуждения прикрепляются при помощи винтов к кольцеобразному ярму статора 4. Ярмо собирается из колец электротехнической стали и с двух сторон прижимается массивными кольцами 3 и 5. Ярмо статора и прижимающие кольца скрепляются между собой при помощи заклепок. Передняя крышка 10 центрируется по наружному диаметру кольца 5, а задняя крышка 13 центрируется на заточке кольца 3. Передняя крышка имеет открытое исполнение, что облегчает осмотр щеток при работе. В нижней части этой крышки имеются выступающие части, к которым прикрепляется бесшарнирное щеточное устройство 11.

Щеточное устройство состоит из трех пар щеток и пяти контактных клемм, из которых три служат для вывода концов обмотки синхронизации и две — обмотки возбуждения. В центральной части передней крышки имеется выступающий поясok с круглой средней частью, в которой помещается один из шарико-

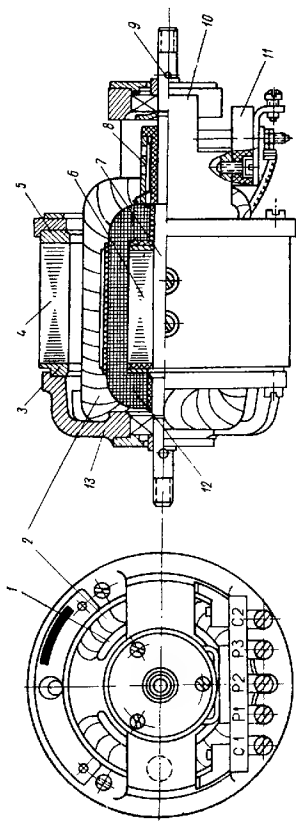


Рис. 133. Общий вид селсина СС-404.

подшипников селсина. Второй шарикоподшипник помещается в задней крышке. Каждая из крышек прикрепляется к прижимным кольцам ярма при помощи трех винтов. Пакет ротора 6 собирается из пластин электротехнической стали и насаживается плотно на ось 7. Пластины ротора укладываются „веером“. Пакет ротора имеет скос по длине на одно пазовое деление. В пазах ротора помещается трехфазная обмотка синхронизации 12. Для предотвращения соприкосновения лобовых частей обмотки с осью на последнюю надеваются изоляционные втулки. На оси ротора со стороны передней крышки помещаются контактные кольца 8, к которым присоединяются концы обмотки ротора. Контактные кольца собираются на отдельной изоляционной втулке, а затем устанавливаются на ось ротора. Матернал контактных колец — никель, а щеток — серебро.

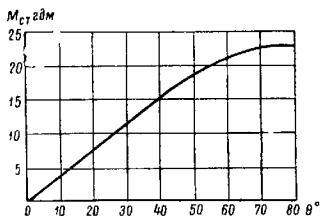


Рис. 134. Кривая синхронизирующего момента приемника СС-404 при работе его от датчика типа ДИ-404.

Ротор вращается на двух шарикоподшипниках. Для крепления стрелок и поводков на концах выступающих частей оси имеется винтовая нарезка, а для фиксации их положения — штифты 9.

Селсин имеет следующие размеры: наружный диаметр — 62 мм, длина корпуса 91 мм, диаметр ротора 28,6 мм, длина пакета ротора 25 мм, диаметр выступающих концов оси 4 мм, внутренний диаметр шарикоподшипников 5 мм.

Номинальные данные селсина СС-404:

Напряжение	110 в	Удельный момент	4 $\frac{гсм}{град}$
Частота	50 гц	Максимальный момент	220 гсм
Потребляемый ток	0,4А	Вес	800 г
Потребляемая мощность	13 вт	Момент трения	9 гсм

На рис. 134 приведена кривая синхронизирующего момента приемника СС-404, работающего от датчика типа ДИ-404. Датчик ДИ-404 и приемник СС-404 совершенно одинаковы как по конструкции, так и по своим обмоточным данным.

Е. Контактный селсин-приемник НС-404

Общий вид селсина-приемника НС-404 показан на рис. 135. НС-404 относится к селсинам второй конструктивной формы. Статор 1 собирается из пластин электротехнической стали,

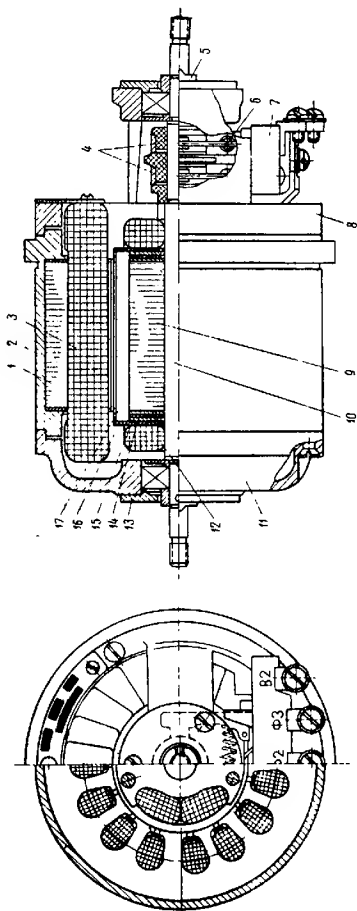


Рис. 135. Общий вид селсина-приемника HC-404.

длина пакета 33 мм. Пластины статора имеют 15 полузакрытых пазов, равномерно распределенных по окружности. Пакет статора собирается „веером“ и имеет скос по длине на одно зубцевое деление. Для уменьшения выпучивания пакета статора по его краям устанавливаются боковые пластины толщиной в 1,0 мм. Пакет статора крепится в литом силуминовом корпусе 2. При изготовлении корпуса пакет статора, собранный на оправке, помещается в форму и заливается силумином. С передней и задней стороны корпуса 2 имеются заточки для посадки крышек. В пазах статора помещается обмотка синхронизации 3, лобовые части которой во избежание соприкосновения с корпусом и крышкой обматываются изоляционной лентой. После намотки и изоляции лобовых частей обмотка пропитывается изоляционными лаками.

Задняя закрытая крышка 11 сделана из силумина. В центре ее имеется сквозное отверстие для посадки шарикоподшипника. Это отверстие закрывается маленькой крышкой 13. Наличие сквозного отверстия в крышке 11 упрощает технологию ее изготовления. Передняя крышка 8, в отличие от задней, открытая. Она состоит из кольцеобразной части с буртиком для центровки и выступающей части с отверстием для шарикоподшипника. К нижней стороне передней крышки прикрепляется шарнирное щеточное устройство 6 с двумя парами щеток из композиции СГ-1. Рабочее давление щеток создается при помощи цилиндрических пружин. С нижней стороны изоляционной платы 7 щеточного устройства 6 помещаются клеммы для включения наружных монтажных проводников. На плате имеется 5 клемм: клеммы B_1 , B_2 для обмотки возбуждения и клеммы Φ_1 , Φ_2 , Φ_3 — для обмотки синхронизации.

Пакет активной стали ротора 9 собирается из пластин электротехнической стали и запрессовывается на ось 10 ротора. Пакет ротора, как и статор, имеет по краям толстые крайние пластины. После установки пакета ротора на ось пазы ротора изолируются и в них вставляются медные стержни 17 демпферной обмотки. После этого по бокам устанавливаются изоляционные пластины 14, медные пластины 15 и производится запаивание демпферной обмотки оловом. Затем устанавливаются изоляционные пластины 16 и наматывается обмотка возбуждения 12, состоящая из двух катушек. Концы обмотки возбуждения присоединяются к контактным кольцам 4, которые по конструкции относятся к сборным кольцам. Материал контактных колец — аргодур. Для фиксации положения стрелок или поводков на оси имеются установочные кольца 5.

Размеры селения таковы: наружный диаметр корпуса 62 мм, длина корпуса 91 мм, наружный диаметр ротора 28,6 мм, длина пакета ротора 33 мм, диаметр выступающих концов оси 4 мм, внутренний диаметр шарикоподшипников 4 мм.

Номинальные данные селсина:

Напряжение	110 в	Удельный момент	10 $\frac{\text{гсм}}{\text{град.}}$
Частота ²	50 гц	Максимальный момент	550 гсм
Потребляемый ток	0,28 А	Момент трения	11 гсм
Потребляемая мощность	8 вт	Вес	0,8 кг

На рис. 136 приведена кривая зависимости синхронизирующего момента приемника НС-404 от угла рассогласования при работе от датчика НД-404, который по своей конструкции и обмоточным данным сходен с приемником.

Как видим, селсины НС-404 имеют перед селсинами СС-404 целый ряд преимуществ. Селсин НС-404, обладая такими же габаритными размерами, что и СС-404, развивает удельный момент, который в два с половиной раза больше, чем удельный момент приемника СС-404. При этом НС-404 потребляет значительно меньший ток и мощность.

Ж. Контактный селсин-приемник НС-501

Общий вид селсина-приемника НС-501 показан на рис. 137. НС-501 по своему устройству относится к селсинам третьей конструктивной формы. Пакет статора 1, обмотка синхронизации 2, корпус 3, передняя крышка 7 и задняя крышка 8 этого селсина по конструкции аналогичны соответствующим элементам селсина НС-404.

Пакет ротора 9 собирается из пластин электротехнической стали, имеющих равномерно распределенные по окружности пазы. Пакет укладывается „веером“. Он имеет скос по длине на одно пазовое деление.

После сборки пакет запрессовывается на ось ротора 10. В пазах ротора наматываются обмотка возбуждения и демпферная обмотка по схеме, приведенной на рис. 132, а. Концы обмотки возбуждения 11 присоединяются к сборным контактным кольцам 4 из аргодура.

Щеточное устройство 6 имеет две пары щеток из серебисто-графитной композиции марки СГ-1. На оси ротора селсина помещается установочное кольцо 5.

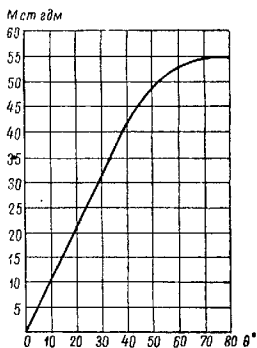


Рис. 136. Кривая синхронизирующего момента приемника НС-404 при работе от датчика НД-404.

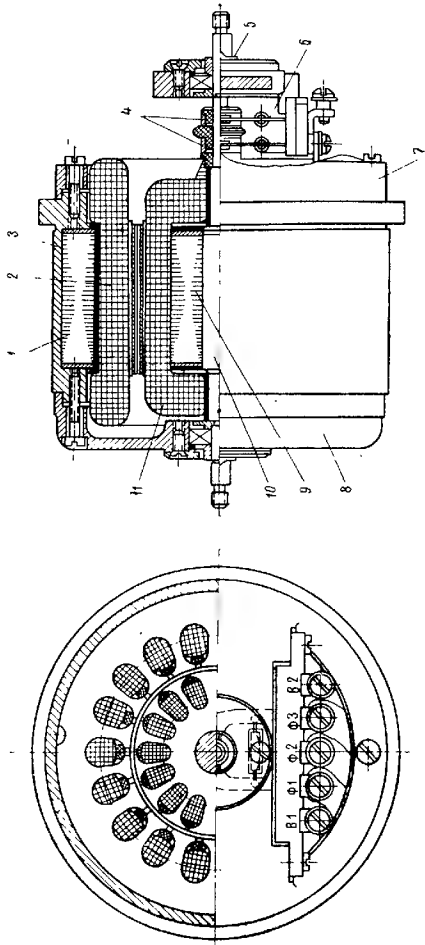


Рис. 137. Общий вид селсина-приемника HS-501.

Селсин НС-501 имеет следующие размеры: наружный диаметр корпуса 100 мм, длина корпуса 123 мм, диаметр ротора 49,6 мм, длина пакета ротора 41 мм.

Номинальные данные селсина НС-501 таковы:

Напряжение	110 в	Удельный синхронизирующий момент	50 $\frac{\text{гсм}}{\text{град}}$
Частота	50 гц	Максимальный синхронизирующий момент	2600 гсм
Потребляемый ток	0,75 А	Момент трения	30 гсм
Потребляемая мощность	15 вт	Вес	2,5 кг

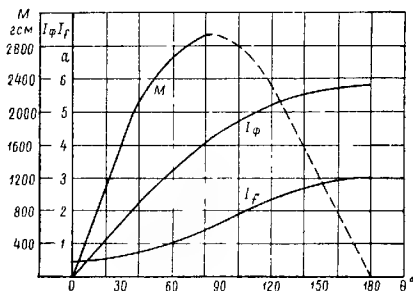


Рис. 138. Кривая синхронизирующего момента приемника НС-501 при работе от датчика НД-501.

На рис. 138 показаны кривые зависимости синхронизирующего момента, тока возбуждения и фазного тока обмотки синхронизации от угла рассогласования при работе от датчика НД-501.

3. Конструкция электрического дифференциала и трансформаторных селсинов

Электрический дифференциал имеет трехфазную обмотку как на статоре, так и на роторе. Его магнитная цепь обязательно должна состоять из неявнополюсных статора и ротора, так как магнитный поток поворачивается как относительно статора, так и относительно ротора. Электрический дифференциал по своему устройству весьма сходен с селсином третьей конструктивной формы. Основное отличие между ними состоит в том, что селсины имеют однофазную обмотку возбуждения и два контактных кольца на роторе, а электри-

ческий дифференциал — трехфазную обмотку и три контактных кольца на роторе.

В системе синхронной передачи, состоящей из двух селсинов и электрического дифференциала, включенного между ними, всегда два элемента выполняют роль датчика (их оси поворачиваются принудительно), а третий — роль приемника (его ось поворачивается сама на угол, равный по величине алгебраической сумме углов поворота датчиков).

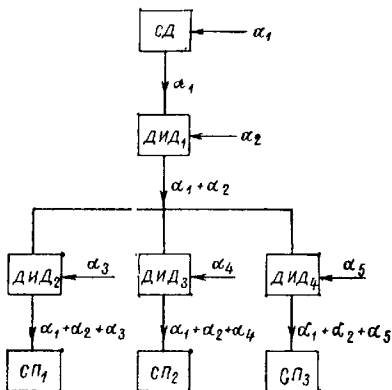


Рис. 139. Разветвленная схема синхронной передачи с электрическими дифференциалами.

В этой системе могут иметь место следующие режимы работы: а) оба селсина работают в качестве датчиков, а электрический дифференциал — в качестве приемника; б) один из селсинов и электрический дифференциал работают в качестве датчиков, а второй селсин — в качестве приемника. В первом случае электрический дифференциал называют дифференциальным приемником, а во втором — дифференциальным датчиком. Разница между дифференциальными датчиком и приемником та же, что и между обычными селсином-датчиком и селсином-приемником: приемник имеет щетки с меньшим давлением по сравнению с датчиком и обычно снабжен механическим демпфером. Однако в случае работы дифференциального приемника с селсинами, обладающими электрическими демпферами, приемник может и не иметь механического демпфера.

Синхронные передачи с электрическим дифференциалом могут иметь и более сложную разветвленную схему. На рис. 139

приведена схема синхронной передачи, состоящая из селсина-датчика СД, дифференциальных датчиков ДИД₁, ДИД₂, ДИД₃, ДИД₄ и селсинов-приемников СП₁, СП₂ и СП₃. Как видно из рисунка, каждый из трех селсинов приемников на своей оси будет воспроизводить углы, равные по величине алгебраической сумме трех углов поворотов: первый — $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$, второй — $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_4$ и третий — $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_5$.

На рис. 140 показан общий вид электрического дифференциала НЭД-101, предназначенного для работы в качестве приемника. Конструкция НЭД-101 аналогична конструкции НС-501.

Номинальные данные НЭД-101:

Частота	50 гц
Линейное напряжение обмотки статора и ротора . . .	55 в
Удельный момент	6 $\frac{\text{гсм}}{\text{град}}$
Максимальный момент	300 гсм

Трансформаторные селсины-датчики по своей конструкции сходны с индикаторными селсинами. Весьма часто одни и те же селсины-датчики могут использоваться как в индикаторных, так и в трансформаторных синхронных передачах. Рекомендуется как трансформаторные селсины-датчики, так и индикаторные селсины выбирать второй и третьей конструктивных форм.

При проектировании трансформаторных селсинов-датчиков следует учитывать, что в отличие от индикаторных селсинов, в их фазных цепях постоянно протекают значительные токи для намагничивания приемников. Селсины-датчики должны в течение длительного времени выдерживать эти токи, не перегреваясь выше установленной нормы.

Трансформаторные селсины-приемники, как правило, должны иметь магнитную цепь, состоящую из неявнополюсных статора и ротора. Данное требование обусловлено тем, что при рабочем положении селсина-приемника ось однофазной обмотки перпендикулярна оси магнитного потока. В том случае, когда однофазная обмотка выполнена на явно выраженных полюсах, магнитный поток будет направлен поперек полюсов и для его создания потребуется более значительный намагничивающий ток. Кроме того, величина этого тока будет изменяться при повороте оси явно выраженных полюсов, что является чрезвычайно нежелательным, так как при параллельной работе нескольких приемников будет иметь место сильное взаимное влияние.

В трансформаторных селсинах-приемниках однофазные и трехфазные обмотки могут располагаться по-разному: а) однофазная обмотка — на роторе, трехфазная — на статоре; б) однофазная — на статоре, трехфазная — на роторе.

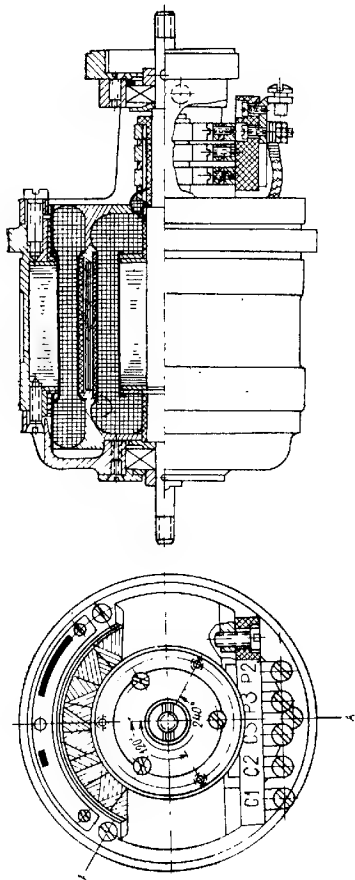


Рис. 140. Общий вид электрического дифференциала НЭД-101.

Как известно, однофазная обмотка трансформаторных приемников включается на входные зажимы усилителей следящих систем и нормально работает при весьма низком напряжении. На первый взгляд кажется, что исключение контакта из этой цепи, т. е. расположение однофазной обмотки на статоре, должно давать некоторые преимущества. Однако практика показывает, что две конструктивные формы трансформаторных приемников дают почти одинаковые результаты.

В отличие от индикаторных приемников, трансформаторные приемники вращаются принудительно при помощи электродвигателя следящей системы; величина момента трения не имеет для них существенного значения. Поэтому давление щеток этих селсинов может быть значительным; величина его может быть выбрана из условия обеспечения надежного контакта.

Конструкция статора, ротора, контактных колец и щеточного устройства трансформаторных селсинов аналогична конструкции соответствующих деталей индикаторных селсинов.

§ 34. КОНСТРУКЦИЯ БЕСКОНТАКТНЫХ СЕЛСИНОВ

Синхронные передачи с контактными селсидами благодаря своим отличным показателям в работе получили широкое распространение. К достоинствам контактных селсинов относятся их высокая статическая и динамическая точность, сравнительно большой удельный и максимальный синхронизирующий моменты, небольшие габаритные размеры и т. д. Конструкция контактных селсинов несложна, а изготовление их не представляет особой трудности. Все это явилось причиной того, что синхронные передачи с контактными селсидами до последнего времени пользовались наибольшим спросом.

Однако контактные селсины обладают следующими основными недостатками: а) сравнительно невысокой и довольно нестабильной статической добротностью, что обусловлено большим и неустойчивым моментом трения, создаваемым контактными кольцами и щетками (на практике это приводит к дополнительным статическим и динамическим ошибкам); б) только при систематическом уходе за скользящими контактами селсины смогут обеспечить надежную работу синхронной передачи в течение длительного времени в условиях вибрации, тряски, повышенной влажности, при изменении окружающей температуры и т. д.

Перечисленные недостатки относятся, по существу, только к контактным селсидам-приемникам, так как статическая добротность для датчиков не имеет значения, а надежность контакта у них обеспечивается достаточным нажимом щеток.

Контактные селсины мало пригодны в тех случаях, когда условия работы не позволяют тщательно следить за щетками.

Все это послужило причиной тому, что были разработаны новые бесконтактные селсины.

Описание конструкции этих селсинов дается ниже. Принцип работы бесконтактных селсинов тот же, что и контактных. Бесконтактные селсины, подобно контактным, имеют однофазные обмотки возбуждения, включаемые в сеть переменного тока, и трехфазные обмотки синхронизации, подключаемые друг к другу.

В бесконтактном селсине обмотка возбуждения создает пульсирующий во времени с частотой сети магнитный поток, ось которого поворачивается с поворотом ротора. В зависимости от положения ротора поток возбуждения индуцирует в фазных обмотках различные по величине напряжения. При одинаковом положении роторов датчика и приемника их фазные э. д. с. взаимно компенсируются, а при рассогласовании роторов компенсация нарушится и в фазных цепях начнут протекать уравнивающие токи, которые, взаимодействуя с потоком возбуждения, создают на оси приемника и датчика синхронизирующие моменты. Иными словами, все описанные явления происходят принципиально точно так же, как и у контактных селсинов.

Бесконтактные селсины отличаются от контактных тем, что если у последних одна из обмоток всегда находится на роторе и ее концы выводятся при помощи контактных колец и щеток, то у бесконтактных селсинов, у которых ротор представляет собой стальной магнитопровод, обе обмотки неподвижны. Магнитный поток в бесконтактном селсине проходит по сложной магнитной цепи, описание которой приведено ниже.

А. Устройство магнитной цепи

На рис. 141, *а* показано устройство магнитной цепи и расположение обмоток бесконтактного селсина, а на рис. 141, *б* для сравнения дано устройство магнитной цепи контактного селсина. На этих рисунках жирными линиями показано прохождение магнитного потока для определенного момента времени. При этом, в тех местах, где поток проходит перпендикулярно плоскости чертежа от нас за плоскость, он обозначен крестиком, а в обратном направлении — точкой.

Бесконтактный селсин состоит из: статора 1 с равномерно распределенными пазами, в которых помещается обмотка синхронизации 2; ротора, состоящего из двух магнитно-разобщенных Г-образных наборных магнитопроводов 3, установленных на оси 4, сделанной из немагнитного материала; внешнего магнитопровода, имеющего два тороидальных сердечника 5 и четыре наборных стержня 6, связывающих их в одну магнитную систему; обмотки возбуждения 7, состоящей из двух кольцеобразных катушек, расположенных над лобовыми ча-

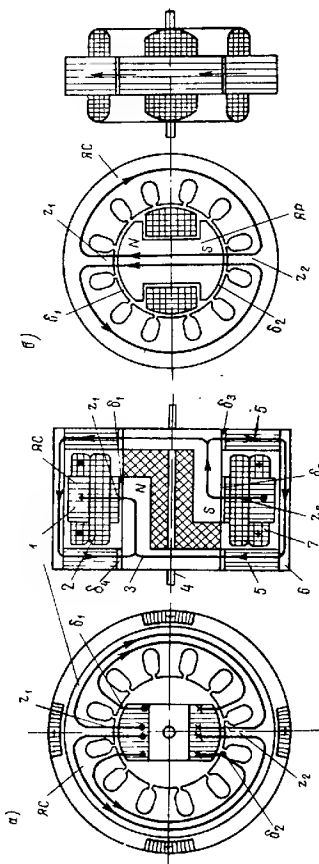


Рис. 141. Магнитные цепи: бесконтактного и контактного селсинов.

стями обмотки синхронизации 2 рядом с наборными сердечниками 5.

Рассмотрим прохождение магнитного потока в контактином и бесконтактном селсинах.

Магнитный поток в контактином селсине, выходя из полюса N , проходит воздушный зазор δ_1 , зубцы z_1 , ярмо статора ЯС, зубцы z_2 , зазор δ_2 и попадает на полюс S , откуда по ярму ротора ЯР снова попадает на полюс N , т. е. замыкается.

В бесконтактном селсине магнитный поток, выходя из полюса N , проходит зазор δ_1 , зубцы z_1 , ярмо статора ЯС, зубцы z_2 , зазор δ_2 и попадает на полюс ротора S . Однако, в отличие от контактного селсина, магнитный поток здесь не может пройти к полюсу N по телу ротора, так как последний разрезан на две части. Поэтому магнитный поток замкнется не внутри ротора, а снаружи, по внешнему магнитопроводу. Достигнув полюса S , поток, разветвляясь на две части, проходит воздушный зазор δ_3 , правый кольцеобразный сердечник 5 в направлении от внутреннего диаметра к наружному, стержни 6 внешнего магнитопровода, левый кольцеобразный сердечник 5 в направлении от наружного диаметра к внутреннему, воздушный зазор δ_4 и попадает с двух сторон на левый магнитопровод 3 ротора и северный полюс N . Таким образом, магнитная цепь замкнется.

Очевидно, при поворачивании оси ротора будут поворачиваться и полюса ротора, а с ними и магнитный поток. Одновременно, в зависимости от положения ротора, будут изменяться фазные э. д. с. обмотки синхронизации.

Сравнивая магнитные цепи контактного и бесконтактного селсинов (см. рис. 141, а, б), можно сделать выводы.

В контактном селсине: а) поток проходит только в поперечных относительно оси плоскостях, а магнитная цепь имеет только поперечную шихтовку активной стали ротора и статора;

б) магнитный поток проходит через два воздушных зазора δ_1 и δ_2 ;

в) обмотка возбуждения непосредственно помещается на полюсах ротора и вращается вместе с ними.

В бесконтактном селсине:

а) магнитный поток проходит в статоре и кольцеобразных сердечниках в плоскостях, поперечных оси машины; статор и сердечник имеют поперечную шихтовку; в роторе и в стержнях внешнего магнитопровода магнитный поток проходит в плоскостях, параллельных оси машины; ротор и стержни внешнего магнитопровода имеют продольную шихтовку;

б) магнитный поток проходит через четыре воздушных зазора (два основных — δ_1 , δ_2 и два дополнительных — δ_3 , δ_4);

в) обмотка возбуждения непосредственно не связана с полюсами ротора и не вращается вместе с ним;

г) в отличие от контактных селсинов, в магнитной цепи содержатся дополнительные элементы — элементы внешнего магнитопровода.

Наличие дополнительных воздушных зазоров у бесконтактного селсина приводит к тому, что при прочих равных условиях он по сравнению с контактным селсином будет потреблять больший ток возбуждения, а наличие у него элементов внешнего магнитопровода и ротора с магнитопроводами, имеющими продольную шихтовку, усложняет конструкцию магнитной цепи этого селсина. Учитывая, что поток возбуждения является пульсирующим переменным потоком, а также невозможность скрепления отдельных элементов магнитной цепи при помощи заклепок из-за опасности образования короткозамкнутых витков, все элементы магнитной цепи приходится скреплять при помощи склейки, а при механической обработке принимать различные меры для предотвращения замыкания пластин, из которых состоят эти элементы.

Б. Конструкция статора и элементов внешнего магнитопровода

Рассматривая рис. 141, а, нетрудно увидеть, что магнитный поток, проходя вдоль оси бесконтактного селсина, слева направо пронизывает пакет статора, причем каждая пластина статора как бы является короткозамкнутым витком на пути этого потока. Поэтому в бесконтактных селсинах применять электрически замкнутые пластины статора недопустимо. Пакет статора в целом должен быть электрически разомкнутым; в магнитном отношении он должен представлять замкнутое, симметричное во всех направлениях кольцо. Это требование определяет, в основном, конструкцию статоров бесконтактных селсинов.

Для того чтобы статор удовлетворял указанному требованию, его пластины разрезаются в одном месте по ярму (рис. 142), покрываются электроизоляционным лаком, например, бакелитовым, и сушатся в печи до тех пор, пока не образуется прочная изоляционная пленка. Затем пластины смазываются специальным клеем и собираются в пакет статора. Так как пакеты укладываются „веером“, то при сборке прорези отдельных пластин смещаются друг относительно друга на одно пазовое деление. Кроме того, по длине пакет сшивается на одно пазовое деление, как и в контактных селсинах. И, наконец, собранный пакет запекается, после чего он и приобретает необходимую механическую прочность.

На рис. 143 показан пакет статора бесконтактного селсина. По наружной поверхности черными прямоугольниками указаны места разреза пластин. Эта поверхность пакета статора после

сборки подвергается шлифовке, а внутренняя поверхность механической обработке не подвергается. Во избежание замыкания при шлифовке соседних между собой пластин чет-

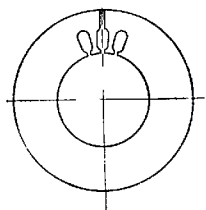


Рис. 142. Пластина статора бесконтактного селсина.

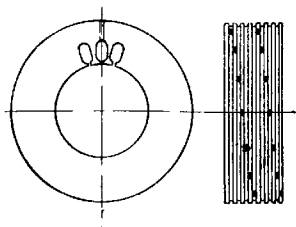


Рис. 143. Пакет статора бесконтактного селсина.

ные пластины имеют одни наружные диаметры, а нечетные — другие.

Устройство кольцевого сердечника аналогично устройству пакета статора. Пластины этого сердечника по тем же при-

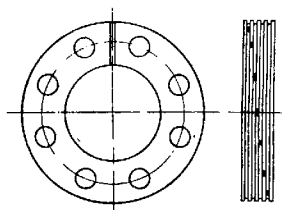


Рис. 144. Кольцеобразный сердечник в собранном виде.

а)



б)



Рис. 145. Корпусы бесконтактных селсинов: а — первого конструктивного типа — целый; б — второго конструктивного типа — составной.

чинам, что и пластины статора, разрезаются в одном месте, изолируются, собираются „веером“ и склеиваются. Как и в пакете статора, четные пластины кольцевых сердечников имеют один диаметр, а нечетные — другой. На рис. 144 показан кольцеобразный сердечник в собранном виде. Отверстия в пластинах служат для облегчения веса сердечников.

На рис. 145, а, б, представлены два конструктивных типа

корпусов бесконтактного селсина со стержнями внешнего магнитопровода.

По первому варианту (рис. 145, *а*) в корпусе с внутренней стороны делаются прямоугольные пазы, в которые укладываются стержни внешнего магнитопровода, состоящие из отдельных пластин электротехнической стали. Пластины перед укладкой в пазы предварительно изолируются и смазываются клеем. Затем корпус со стержнями подвергается сушке при высокой температуре. Внешний магнитопровод имеет 6 или 8 стержней. Иногда в пазы, с целью избежать соприкосновения пластин с корпусом, укладываются изоляционные материалы, например прессшпан. Стержни внешнего магнитопровода обычно после сборки подвергаются механической обработке в местах посадки кольцеобразных сердечников.

Корпус второго конструктивного типа представляет собой (рис. 145, *б*) круглый полый цилиндр, изготавливаемый из силумина, внутрь которого запрессовывается набор из стержней внешнего магнитопровода и клиньев, имеющих форму трапеции. Стержни внешнего магнитопровода предварительно собираются и склеиваются в пакеты.

Несмотря на то, что два типа корпусов отличаются друг от друга по своей конструкции, на практике они дают почти одинаковые результаты.

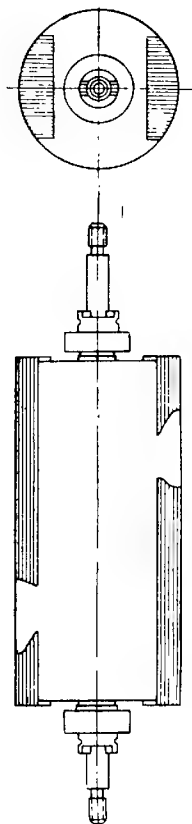
Основным недостатком обоих вариантов корпуса со стержнями внешнего магнитопровода является их незначительная механическая прочность. Поэтому во время механической обработки корпуса следует принимать особые меры предосторожности для того, чтобы обеспечить его правильную конфигурацию.

В. Конструкция ротора

На рис. 146 показан один из вариантов конструкции ротора бесконтактного селсина без торцевых пакетов. Ротор состоит из двух Г-образных магнитопроводов, которые скрепляются между собой посредством заливки силумином или опрессовки пластмассой, и оси из немагнитной стали. Эти сердечники собираются отдельно из тонких пластин электротехнической стали двух различных конфигураций. Общий вид сердечника показан на рис. 147. Форма пластин выбирается таким образом, чтобы после обработки наружной поверхности ротора (пунктирная линия) ширина пластин в различных участках (участки *А* и *Б*) была бы приблизительно одинаковой. Магнитопроводы собираются так же, как и статор или кольцеобразные сердечники, т. е. пластины предварительно изолируются, затем склеиваются и, наконец, запекаются. После выполнения всех этих операций высверливается отверстие для оси. Сборку элементов ротора производят непосредственно в прессформе для опрессовки или в форме для литья.

Преимущество способа крепления элементов ротора посредством опрессовки пластмассой состоит в том, что этот способ совершенно исключает возможность замыкания между собой отдельных элементов. Недостатком же этого способа крепления является то, что при работе могут иметь место небольшие сколы пластмассы, скрепляющей элементы ротора, а при длительной эксплуатации, особенно при циклических изменениях температуры и влажности окружающей среды, возможно изменение геометрических размеров ротора. Наоборот, элементы ротора, скрепленные между собой при помощи силумина, даже при длительной эксплуатации сохраняют свои размеры. Однако при последнем способе крепления не исключена возможность замыкания отдельных элементов ротора.

Рис. 146. Ротор бесконтактного селсина без торцевых пакетов.



Из рис. 146 видно, что переход магнитного потока из ротора в кольцеобразные сердечники будет происходить не по всей окружности ротора, а только по тем дугам, которые занимает магнитопровод, что приводит к увеличению ампервитков, необходимых для проведения магнитного потока через дополнительные зазоры. Обычно магнитопровод занимает дугу $2 \times 90^\circ = 180^\circ$. Вследствие этого используется только половина окружности ротора.

Указанный недостаток не присущ ротору с торцевыми пакетами (рис. 148). Этот ротор, кроме Г-образных магнитопроводов 1, имеет дополнительные магнитопроводы — торцевые пакеты 2, которые помещаются на концах ротора. Из рис. 148 видно, что часть магнитного потока из Г-образных

магнитопроводов приходит в торцевые пакеты, а отсюда в кольцеобразные сердечники. Следовательно, магнитный по-

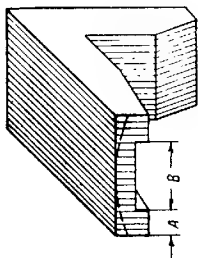


Рис. 147. Г-образный сердечник ротора бесконтактного селсина.

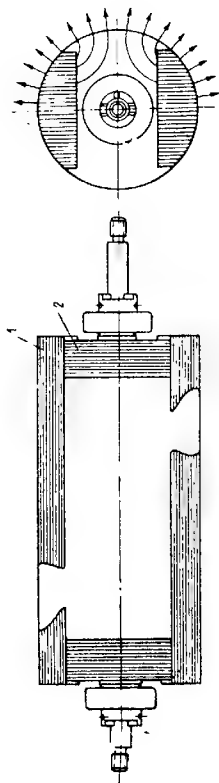


Рис. 148. Ротор бесконтактного селсина с торцевыми пакетами.

ток будет поступать в кольцеобразные сердечники по всей окружности.

Обычно торцевые пакеты собираются отдельно, а затем вставляются в углубления Г-образных магнитопроводов.

Подобный ротор позволяет уменьшить токи возбуждения селсина. Недостатком же торцевых пакетов является то, что они усложняют конструкцию ротора и увеличивают момент его инерции. Однако в большинстве случаев уменьшение тока возбуждения имеет столь существенное значение, что, несмотря на эти недостатки, отдается предпочтение конструкции ротора с торцевыми пакетами.

Г Бесконтактный селсин БС-404А

Общий вид бесконтактного селсина-приемника БС-404А представлен на рис. 149. Корпус селсина 6 отливается из силумина; его цилиндрическая часть выполняет функции корпуса, а дно — функции задней крышки. В центральной части дна корпуса, для обеспечения надежной посадки шарикоподшипника, имеется стальная арматура 9. Наружная поверхность корпуса от дна до буртика является посадочной поверхностью, а буртик служит для крепления селсина в приборах. С передней стороны корпуса имеется утолщение, куда входят винты для крепления передней крышки. Внутри корпус имеет гладкую цилиндрическую поверхность, куда запрессовываются стержни внешнего магнитопровода 10 и распорные клинья 11. На передней части стержней внешнего магнитопровода 10 находятся небольшие уступы для посадки кольцеобразного сердечника 3.

В центральной части корпуса 6 помещается пакет статора 7, который держится на клиньях 11.

В пазах статора помещается обмотка синхронизации 5, а между лобовыми частями обмотки синхронизации и кольцеобразными сердечниками — катушки возбуждения 4. Концы от расположенной с задней стороны катушки выводятся вперед через пазы статора. Катушки возбуждения 4 изолируются от лобовых частей обмотки 5 и кольцеобразных сердечников 3 и 8 при помощи прокладок из лакоткани. Передняя крышка 2, изготовленная из силумина, в центральной части имеет стальную арматуру 1 для посадки шарикоподшипника, а с края — фасонную выемку для установки разборной платы 12, состоящей из пластмассового корпуса и пяти клемм.

При разборке клеммной платы отвинчиваются все винты как с передней стороны, так и с задней, а затем снимается корпус платы. При этом клеммы остаются на выводных концах. Клеммная плата крепится к крышке при помощи двух винтов 13, а передняя крышка — к корпусу при помощи четырех винтов 14.

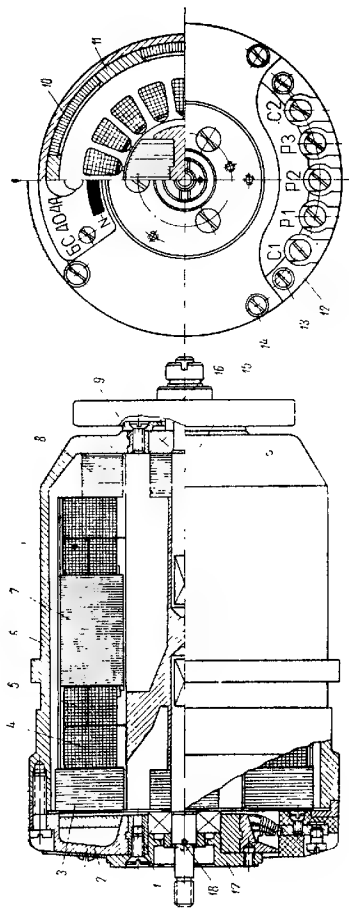


Рис. 149. Общий вид селсина BS-404А.

Ротор селсина 15 с торцевыми пакетами вместо целой оси из немагнитного материала имеет две полуоси из конструкционной стали, которые механически соединяются между собой в единое целое посредством заливки силуминиом. Ротор вращается на двух шарикоподшипниках.

Отверстия для шарикоподшипников в корпусе и крышке закрываются с наружной стороны при помощи заглушек 16 и 17. Последняя из них имеет по наружному диаметру заточку

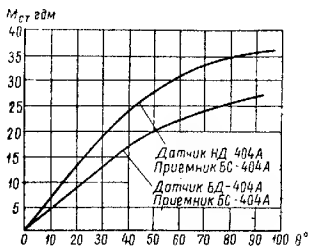


Рис. 150. Кривые синхронизирующего момента селсина-приемника БС-404А.

Селсин БС-404А имеет следующие размеры: наружный диаметр корпуса — 62 мм, наружный диаметр ротора — 25,6 мм, длина пакета статора — 24,5 мм, длина корпуса — 96,5 мм, наружный диаметр демпфера — 48 мм.

Номинальные данные селсина:

Напряжение	110 в
Частота	50 гц
Линейное напряжение обмотки синхронизации	49 в
Потребляемый ток	0,45 а
Потребляемая мощность	14 вт
Вес селсина	1,25 кг

На рис. 150 приведены кривые синхронизирующего момента селсина-приемника БС-404А в зависимости от угла рассогласования при работе от бесконтактного селсина-датчика БД-404А и контактного селсина-датчика НД-404. Селсин БД-404А отличается от селсина БС-404А тем, что у него нет механического демпфера. Как видно из рисунка, удельный момент селсина БС-404А равен: при работе от датчика БД-404А — 5 гсм/град, при работе от датчика НД-404 — 7 гсм/град, а максимальный момент соответственно равен 270 и 360 гсм.

Д. Бесконтактный селсин ДБС-500

Двойной бесконтактный селсин-приемник ДБС-500 представляет собой конструктивное сочетание двух селсинов-приемников в одном корпусе, один из которых имеет полую ось, а второй — сплошную ось, проходящую через отверстие оси первого селсина. Селсин ДБС-500 служит для воспроизведения на одной шкале данных, поступающих от двух различных датчиков. Каждый из приемников, входящих в состав ДБС-500, имеет самостоятельную магнитную цепь. Общий вид ДБС-500 представлен на рис. 151.

Корпус 1 селсина ДБС-500 отливается из силумина. Он имеет по внутреннему диаметру сквозные прямоугольные канавки, куда укладываются стержни внешнего магнитопровода приемников со сплошной осью 2 и полую ось 3. В промежутках между стержнями внешнего магнитопровода в двух диаметрально противоположных точках имеются канавки 4 для вывода концов обмоток приемников на клеммные платы. На середине корпуса 1 помещается силуминовый кронштейн 5, имеющий в центре стальную арматуру 6 для укрепления шарикоподшипников с одной стороны для полую оси, а с другой для сплошной. Положение кронштейна 5 по длине корпуса фиксируется тремя цилиндрическими штифтами, проходящими через корпус и расположенными по окружности под углом 120° друг к другу. Между кронштейном 5 и задней крышкой 7 находится пакет статора с обмоткой синхронизации 9 приемника со сплошной осью. Лобовые части обмотки синхронизации выходят прямо из пазов, образуют цилиндрическую поверхность, на которую надеваются катушки обмотки возбуждения 10. Справа и слева от статора 8 расположены кольцеобразные сердечники 11. Между кронштейном 5 и передней крышкой 12 располагается пакет статора 13 приемника с полую осью, имеющий обмотку синхронизации 15 и обмотку возбуждения 14. Справа и слева от пакета статора 13 расположены кольцеобразные сердечники 16. Лобовые части обмоток синхронизации и катушки возбуждения изолируются лакотканью. В местах соприкосновения обмоток с кольцеобразными сердечниками помещаются изоляционные прокладки из лакоткани. Задняя крышка 7 и передняя крышка 12 отливаются из силумина. В центральной части они имеют стальную арматуру для посадки шарикоподшипников. Каждая из крышек прикрепляется к корпусу при помощи четырех винтов. Роторы 17 и 18 селсинов имеют торцевые пакеты.

Сплошная ось для роторов изготавливается из немагнитной стали, а полая ось — из бронзы. Как на роторе со сплошной осью со стороны задней крышки, так и на роторе с полую осью со стороны передней крышки, установлены фрикционно-инерционные двухступенчатые демпферы для гашения колебаний.

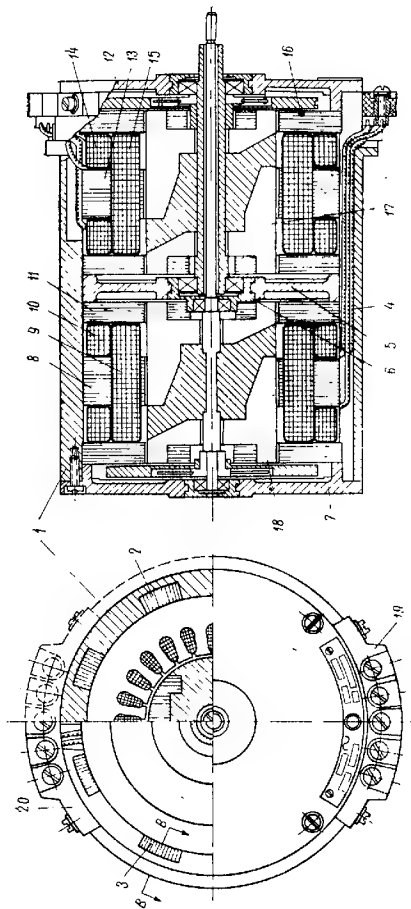


Рис. 151. Бесконтактный селсин ДБС-500.

Механический демпфер для приемника со сплошной осью имеет свою втулку и отдельно собирается на этой втулке, а демпфер, предназначенный для приемника с полый осью, не имеет втулки и собирается непосредственно на оси селсина. Ввиду того, что маховое колесо находится в непосредственной близости от элементов магнитной цепи, для исключения возможности появления электромагнитных сил притяжения маховая масса изготавливается из бронзы. На корпусе, со стороны передней крышки, помещаются две клеммные платы: одна из них 19 предназначена для вывода концов приемника со сплошной осью, а другая 20 — для приемника с полый осью. Клеммные платы опрессовываются из пластмассы. Каждая из них имеет по пять клемм. B_1, B_2 служат для обмотки возбуждения, а Φ_1, Φ_2, Φ_3 — для обмотки синхронизации. Выступающие коицы полый и сплошной оси имеют гладкую цилиндрическую поверхность. Насаживаемые на эти концы стрелки прикрепляются к оси при помощи стопорных винтов.

На практике очень часто отдают предпочтение бесконтактным селсинам ДБС-500. Например, в приборах управления кораблем один из приемников служит для указания команд, а другой — для сообщения об их исполнении; таким образом проверка исполнения весьма облегчается. Если стрелки приемников совпадают, то исполнение соответствует команде, а если стрелки приемников не совпадают, то исполнение команде не соответствует. Селсин ДБС-500 имеет размеры: наружный диаметр корпуса 100 мм, длина корпуса 140 мм, наружный диаметр пакета статора 85 мм, внутренний диаметр пакета статора 44 мм, наружный диаметр ротора 43,6 мм, длина пакета статора 16 мм.

Приемники с полый и со сплошной осью имеют одинаковые размеры магнитной цепи и одинаковые обмоточные данные. Приемник с полый осью, вращающийся на шарикоподшипниках большого размера, имеет по сравнению с приемником со сплошной осью несколько больший момент трения.

Каждый из приемников имеет следующие номинальные данные:

Напряжение	127 в
Частота	50 гц
Линейное напряжение фазной обмотки	55 в
Потребляемый ток	0,45 а
Потребляемая мощность	16 вт
Вес селсина	4,5 кг

На рис. 152 дана кривая синхронизирующего момента приемника ДБС-500 при работе от бесконтактного датчика БД-500 и контактного датчика ДН-500. Удельный момент приемника

при работе от датчика БД-500 равен $10 \frac{\text{гсм}}{\text{град}}$, при работе от датчика ДН-500 — $20 \frac{\text{гсм}}{\text{град}}$; максимальный момент при работе от датчика БД-500 равен 500 гсм, а от датчика ДН-500 — 800 гсм.

Датчик БД-500 по размерам магнитной цепи и обмоточным данным сходен с приемником ДБС-500.

§ 35. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ СЕЛСИНОВ

Дадим сравнительную оценку контактных и бесконтактных селсинов.

По надежности бесконтактные селсины значительно превосходят контактные селсины, так как бесконтактные селсины, не имея трущихся контактов, могут работать в течение длительного времени, почти без всякого ухода. В то же время контактные селсины-датчики по надежности мало уступают бесконтактным

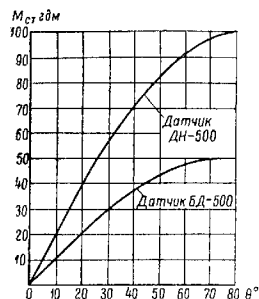


Рис. 152. Кривые синхронизирующего момента приемника ДБС-500: при работе от датчика БД-500; при работе от датчика ДН-500.

селсинам, так как в контактных датчиках установлены щетки с достаточным давлением, которые при незначительном уходе могут работать надежно в течение длительного времени.

Бесконтактные селсины, благодаря необходимости устанавливать элементы внешнего магнитопровода и склеивать все элементы магнитной цепи, а также производить продольную и поперечную шихтовку, более трудоемки в производстве, чем контактные селсины.

При построении серии контактные селсины значительно удобнее бесконтактных селсинов. Серии контактных селсинов, как и большинства других электрических машин, строятся по принципу выбора нескольких диаметров и проектирования нескольких машин на каждом из диаметров. Схема построения серии дает возможность использовать одни и те же штампы, формы для литья и т. д. для нескольких типов машин. Например, серия контактных селсинов спроектирована (см. приложение 3) на двух диаметрах — 100 и 62 мм; на первом диаметре имеются три машины НД-501, НД-511 и НД-521, а на втором — машины НД-404, НД-414. Производные машины отличаются друг от друга длиной пакета статора и ротора, а следовательно, и рабочим магнитным пото-

ком. Поток длинной машины иногда превышает поток короткой машины того же диаметра в два-три раза.

Создание рациональных производных бесконтактных селсинов со значительной разницей рабочего магнитного потока не представляется возможным. Причина этого заключается в том, что в бесконтактном селсине имеет место продольное перемещение магнитного потока. Если предположить, что мы имеем бесконтактный селсин с рационально выбранными размерами магнитной цепи, а нам необходимо построить машину с вдвое большим магнитным потоком, то для этого, очевидно, необходимо увеличить сечение всех участков магнитопровода в два раза. Увеличить сечение участков магнитной цепи статора и кольцевых магнитопроводов сравнительно легко, для этого надо увеличить длину пакетов. Увеличить же сечения магнитопроводов ротора и стержней внешнего магнитопровода, не изменив при этом диаметр ротора и наружный диаметр селсина, не представляется возможным. Следовательно, для увеличения магнитного потока в два раза необходимо спроектировать такой селсин, у которого были бы увеличены диаметры ротора и корпуса.

По удельной мощности и удельному моменту контактные селсины имеют значительные преимущества перед бесконтактными селсинами. В табл. 3 приведены сравнительные данные контактных и бесконтактных селсинов с одинаковыми габаритными размерами.

Таблица 3

Тип селсина	Удельная мощность <i>мва/град²</i>	Тип селсина	Удельный момент <i>гсм/град</i>	Добротность
БД-404	6,2	БС-404	4,5	1,0
НД-404	17,7	НС-404	10	1,0

Из табл. 3 видно, что удельный момент и удельная мощность контактных селсинов более чем в два раза превышают удельный момент и удельную мощность бесконтактных селсинов. Однако, по добротности бесконтактные селсины-приемники не уступают контактным селсинам-приемникам. Это объясняется тем, что момент трения контактных селсинов значительно выше момента трения бесконтактных селсинов.

На основе сказанного выше можно дать следующие указания относительно применения контактных и бесконтактных селсинов.

Для синхронной передачи в качестве приемников рекомендуется применять бесконтактные селсины, имеющие высокую надежность работы.

При небольшом числе параллельно работающих приемников в качестве датчика целесообразно применять бесконтактные селсины, а при большом числе параллельно работающих приемников — селсины контактные. Последняя рекомендация связана с тем, что с увеличением числа параллельно включенных приемников все более увеличивается значение удельной мощности датчика, и хорошую работу синхронной передачи может обеспечить только датчик с большой удельной мощностью, т. е. контактный селсин.

При наличии хотя бы небольших нагрузок на оси приемника целесообразно применять контактные селсины-приемники, так как они имеют значительно больший удельный момент по сравнению с бесконтактными приемниками и будут обладать меньшими ошибками.

Контактные селсины-приемники могут быть применены также во всех случаях, когда возможно обеспечить систематический уход за ними.

Глава VII

РАСЧЕТ СЕЛСИНОВ

§ 36. ВЫБОР ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ, ЧАСТОТЫ И НАПРЯЖЕНИЯ

В настоящей главе рассматриваются методы расчета контактных и бесконтактных селсинов. Для контактных селсинов приводится метод расчета селсинов второй и третьей конструктивных форм, имеющих практическое значение. При этом подробно рассматриваются только вопросы расчета магнитной цепи и параметров селсинов по поперечной и продольной осям. Способы решения задач, не носящих специфического для селсинов характера, показываются в примерах расчета.

Тепловой расчет вовсе не рассматривается, так как существующие методы этого расчета в применении к микродвигателям, каковыми являются и селсины, дают неудовлетворительные результаты. Причиной этого является то, что нагрев микродвигателей в сильной степени зависит от способа крепления их к рабочему механизму, а также от размеров и теплового режима самого рабочего механизма. Как правило, все микродвигатели, взятые отдельно, без дополнительной теплоотводящей поверхности, нагреваются выше, чем допустимо по нормам. Из-за этого в большинстве случаев определение перегрева обмоток селсинов производится экспериментально. Необходимая для проведения расчета селсинов величина суммарных допустимых потерь обычно берется из опыта.

При проектировании селсинов задают следующие величины:

- 1) напряжение сети;
- 2) частоту сети;
- 3) удельный или максимальный синхронизирующий момент, а иногда то и другое;
- 4) нагрузку на оси селсинов.

В некоторых случаях частота сети может быть не задана и отнесена к вопросам, решаемым при расчете. Большинство селсинов рассчитано для работы от сети промышленной частоты 50 гц. Однако в последние годы, в связи с применением магнитных усилителей в автоматических системах, все чаще начинают применяться селсины, рассчитанные для работы от сети с частотой 400 гц и выше. Поэтому представляет

практический интерес определение зависимости показателей селсинов от частоты питающей сети.

Как это будет показано ниже, определение этих вопросов тесно связано с размерами селсинов. Поэтому установим взаимосвязь показателей селсинов с частотой сети и размерами селсинов. Для упрощения исследования возьмем селсин без демпферной обмотки в поперечной оси и посмотрим, как будут изменяться удельный момент и потребляемая мощность его при изменении частоты и размеров селсина. Будем также полагать, что все геометрические размеры селсина изменяются пропорционально.

Из формулы (5.18) имеем

$$m_0 = \frac{2,12}{f} E_{\Phi}^2 \frac{x_q}{x_q^2 + r_q^2} \cdot \frac{2\omega m}{2\pi a d}.$$

Учитывая, что $E_{\Phi} = k_1 f \cdot \Phi_d$ и $x_q = k_2 f$, где k_1 и k_2 — некоторые постоянные, выражение для m_0 запишем в виде:

$$m_0 = k_3 \Phi_d^2 \frac{x_q^2}{x_q^2 + r_q^2} = k_3 \Phi_d^2 \frac{1}{1 + \left(\frac{r_q}{x_q}\right)^2}. \quad (36.1)$$

Определим зависимость отношения r_q и x_q от геометрических размеров селсина и частоты сети.

Активное сопротивление r_q для селсина без демпферной обмотки равно

$$r_q = \frac{2\omega_2(l + l_s)}{5700q_1},$$

где l — длина активной части витка;

l_s — длина лобовой части витка;

q_1 — сечение проводника;

ω_2 — число витков фазы синхронизирующей обмотки.

Учитывая, что

$$q_1 = \frac{S_n \cdot k_3 \cdot p q}{\omega_2},$$

получим

$$r_q = \frac{2\omega_2^2(l + l_s)}{5700 \cdot S_n \cdot k_3 \cdot p \cdot q},$$

где S_n — сечение паза;

k_3 — коэффициент заполнения паза;

q — число пазов на полюс и фазу.

При нашем предположении, что все геометрические размеры селсина изменяются пропорционально, мы можем написать $S_n = k_4 D^2$; $l + l_s = k_5 D$, где D — диаметр ротора.

Подставляя эти величины в формулу для r_q , получаем

$$r_q = k_8 \frac{\omega_2^2}{D}. \quad (36.2)$$

Аналогично для индуктивного сопротивления x_q имеем

$$x_q = x_s + x_{aq};$$

$$x_s = 15,8 f \omega_2^2 \frac{(l_1 + l_s l_s)}{q} = k_7 f D \omega_2^2,$$

так как l и l_s пропорциональны D .

Величина x_{aq} определяется по формуле (38.8):

$$x_{aq} = k_8 f \omega_2^2 D,$$

так как l , τ и δ'' пропорциональны D .

Следовательно,

$$x_q = x_s + x_{aq} = k_9 f \omega_2^2 D. \quad (36.3)$$

Теперь легко можно определить отношение активного сопротивления r_q к индуктивному сопротивлению x_q по поперечной оси

$$\frac{r_q}{x_q} = \frac{k_8 \omega_2^2}{D k_9 f \omega_2^2} = \frac{k_{10}}{f D^2}. \quad (36.4)$$

Это простое уравнение устанавливает весьма важное соотношение, а именно: отношение активного сопротивления к индуктивному сопротивлению по поперечной оси обратно пропорционально частоте в первой степени и диаметру ротора селсина во второй степени.

Как говорилось в § 12, отношение x_q/r_q существенно влияет на кривую синхронизирующего момента. Оптимальный селсин должен иметь $r_q = x_q$.

Уравнение (36.4) позволяет сделать следующие выводы:

1. При заданной частоте f существует только один определенный диаметр D , при котором селсин имеет оптимальные параметры.

2. С увеличением частоты сети диаметр селсина с оптимальными параметрами уменьшается.

Эти выводы подтверждаются практикой.

Учитывая, что при изменении отношения r_q/x_q от оптимального в некоторых пределах селсин все же может иметь приемлемые для практики характеристики, технически возможно создание, при заданной частоте, серии селсинов, диаметры которых находятся в определенных пределах. Так, например, для частоты 50 гц возможно создание селсинов с параметрами, близкими к оптимальным при изменении наружного диаметра в пределах 60–120 мм. При других диа-

метрах селсины будут иметь параметры, значительно отличающиеся от оптимальных. При частоте 500 гц оптимальные диаметры лежат в пределах от 30 до 50 мм.

Рассмотрим, как будет изменяться потребляемая кажущаяся мощность и удельный момент у селсина с оптимальными параметрами, если увеличивать частоту. Предположим, что при увеличении частоты сети поток Φ_d останется неизменным. В этом случае намагничивающий ток I_0 также будет постоянным, а потребляемая кажущаяся мощность будет равна

$$P_1 = E_1 I_0 = k \Phi_d f I_0 = k_{11} f.$$

На основе (36.1), обозначая $f = n f_1$, где f_1 — частота сети, при которой селсин имеет оптимальные параметры, получим

$$\frac{P_1}{m_0} = \frac{k_{11} n f_1 \left[1 + \frac{1}{n^2} \right]}{k_3 \Phi_d^2} = k_{12} \left(n + \frac{1}{n} \right).$$

При различных n имеем:

n	1	5	10
$\frac{P_1}{m_0}$	$2 k_{12}$	$5,2 k_{12}$	$10,1 k_{12}$

Эти данные позволяют сделать вывод, что для селсина, имеющего оптимальные параметры при некоторой частоте f_1 , повышать частоту сети невыгодно, так как для получения того же самого удельного момента необходимо затрачивать большую кажущуюся мощность.

Таким образом, для селсинов с диаметром корпуса менее 50—60 мм целесообразно применять повышенные частоты сети до 500 гц, а для селсинов больших размеров частоту 50 гц.

Напряжение обмотки синхронизации селсина, если не учитывать сопротивление линии связи между приемником и датчиком, может быть взято любое. При этом синхронизирующий момент не будет зависеть от величины напряжения, если полагать, что коэффициент заполнения паза остается неизменным.

Это очень легко установить, пользуясь формулой (5.18). Действительно, если мы захотим увеличить напряжение E_Φ в n раз, то придется увеличить число витков обмотки синхронизации также в n раз. Тогда r_q и x_q увеличатся в n^2 раз и по формуле (5.18) получим, что момент остается прежним.

Если учитывать сопротивление линии, как это бывает необходимо на практике, то величина напряжения фазной обмотки не может быть взята произвольно.

В § 16 было показано, что сопротивление линии имеет существенное влияние на величину синхронизирующего момента селсина. Из формулы (16.9) нетрудно увидеть, что благодаря наличию линии связи синхронизирующий момент уменьшается и это уменьшение будет тем сильнее, чем больше сопротивления линии $r_{лд}$ и $r_{лп}$ по сравнению с сопротивлениями r'_{q1} , x'_{q1} датчика и r'_{q2} , x'_{q2} приемника. Для уменьшения влияния линий на работу синхронной передачи необходимо, чтобы сопротивления селсинов r'_{q1} , x'_{q1} , r'_{q2} и x'_{q2} были значительно больше сопротивлений линии $r_{лд}$ и $r_{лп}$. Для выполнения этого условия, очевидно, необходимо брать большое число витков в обмотках синхронизации датчика и приемника. Однако число витков и напряжение обмотки взаимно связаны и увеличение одного из них ведет к увеличению другого, поэтому при наличии длинной линии связи необходимо повышать напряжение обмотки синхронизации.

Для синхронной передачи, работающей от сети 50 гц при длине линии до нескольких сот метров, можно брать селсины с напряжением фазных обмоток 55 в; при больших расстояниях напряжение необходимо повышать до 110, а иногда и до 220 в. Так как при увеличении напряжения фазной обмотки сопротивления обмоток увеличиваются пропорционально квадрату напряжения, то селсины с напряжением 220 в по сравнению с селсинами тех же размеров, но напряжением 55 в, могут работать при длине линии, в 16 раз большей.

При выборе величины отношения l/D для контактных и бесконтактных селсинов следует учитывать, что динамические ошибки зависят от динамической добротности, которая равна m/I , т. е. отношению удельного момента к моменту инерции ротора. Для уменьшения динамической ошибки при проектировании селсинов необходимо принимать меры к увеличению динамической добротности; этого можно добиться, увеличивая удельный момент и уменьшая момент инерции. Из этих соображений при проектировании селсинов не рекомендуется брать малые отношения l/D .

Так как селсины являются двухполюсными машинами, то при малых отношениях l/D длины лобовых частей обмоток будут составлять значительную долю всей длины витка, что не может не привести к увеличению r_q , а следовательно, к уменьшению удельного момента и динамической добротности селсинов.

Кроме того, при малом отношении l/D диаметр будет велик, что приведет к увеличению момента инерции и уменьшению динамической добротности селсинов.

Для контактных селсинов величина отношения l/D может быть рекомендована в пределах 0,75—1,75. Верхний предел этого отношения обусловлен только конструктивными соображениями. При больших длинах селсинов уменьшается механическая прочность ротора, и селсин делается мало пригодным для работы при вибрации и тряске.

Здесь будет не лишне сказать, что селсины, предназначенные для работы в качестве приемников, имеют сравнительно небольшую длину пакета и для них отношение l/D обычно не превосходит 1,1, а селсины-датчики, особенно те из них, которые предназначены для работы с большим числом приемников, имеют пакеты статора наибольшей длины и для них величина отношения l/D доходит до 1,75.

Для бесконтактных селсинов нижний предел отношения l/D может быть взят таким же, как и для контактных селсинов, т. е. $l/D = 0,75$. Верхний же предел отношения l/D для бесконтактных селсинов значительно ниже, чем у контактных селсинов, так как после того, как величина отношения l/D достигнет некоторого предела, дальнейшее ее возрастание будет связано с чрезмерным увеличением индукции в магнитопроводах ротора и в стержнях внешнего магнитопровода. Постараемся определить величину этого критического отношения l/D .

На рис. 153 представлена часть ротора, находящаяся непосредственно в расточке пакета статора. Определим сечение магнитопровода ротора. Обычно для бесконтактных селсинов $\alpha_i = 0,5$:

$$b_1 = D \sin \frac{\alpha_i \pi}{2} \approx 0,7D; \quad (36.5)$$

$$h_1 = D - 2h_2 - h_3 = D \cos \frac{\alpha_i \pi}{2} - h_3. \quad (36.6)$$

Для ограничения потока рассеяния между магнитопроводами ротора обычно берется $h_3 = 30\delta_1 = 0,15D$ (см. 37.9).

Следовательно,

$$h_1 = D \cos \frac{0,5\pi}{2} - 0,15D \approx 0,55D. \quad (36.7)$$

Теперь по формуле (37.27') найдем сечение магнитопровода при $\alpha_i = 0,5$:

$$S_r = 0,93 \left[\frac{D_r^2}{8} (0,5\pi - \sin 0,5\pi) + 0,7D \cdot 0,55D \right] = 0,42D^2. \quad (36.8)$$

Сечение основного воздушного зазора равно

$$S_{\delta_1} = \alpha_i l \tau = \alpha_i \frac{\pi D}{2} l = 0,785Dl.$$

Очевидно, отношение индукций в магнитопроводе ротора и в зазоре δ_1 будет равно

$$\frac{B_r}{B_{\delta_1}} = \frac{S_{\delta_1} (1 + \sigma_1)}{S_r} = \frac{0,785 D l (1 + 0,1)}{0,42 D^2} \approx 1,92 \frac{l}{D}. \quad (36.9)$$

Коэффициент рассеяния между магнитопроводами ротора здесь принят равным $\sigma_1 = 0,1$. Величина σ_1 обычно колеблется в пределах $0,08 \div 0,15$.

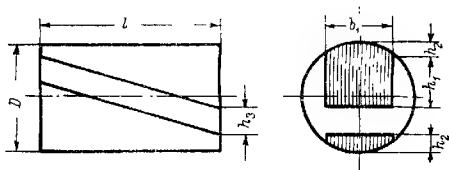


Рис. 153. Часть ротора бесконтактного селсина, находящаяся в расточке пакета статора.

Из этой формулы найдем

$$\frac{l}{D} \approx 0,48 \frac{B_r}{B_{\delta}}. \quad (36.10)$$

Беря максимально допустимые величины индукций $B_r = 16\,000$ гс и $B_{\delta} = 6000$ гс, получим

$$\frac{l}{D} \approx 0,48 \frac{16\,000}{6000} = 1,3. \quad (36.11)$$

Эту величину следует считать предельной. Практически ограничиваются значением $\frac{l}{D} = 1,2$.

Дальнейшее увеличение отношения $\frac{l}{D}$ в бесконтактных селсинах нецелесообразно, так как магнитопровод ротора насыщается и увеличение длины пакета статора не приводит к существенному увеличению магнитного потока, а индуктивные и активные сопротивления обмотки синхронизации увеличиваются и поэтому синхронизирующий момент практически мало изменяется.

По указанным причинам для бесконтактных селсинов можно порекомендовать выбирать значения отношения $\frac{l}{D}$ в пределах $0,75 \div 1,2$.

Выбор диаметра расточки статора является одним из важнейших моментов расчета для всех электрических машин.

Правильный выбор диаметра расточки статора определяет успех дальнейшего расчета. По данным испытаний для большинства электрических машин определены машинные постоянные и построены серии кривых, которые дают возможность правильно выбрать диаметр и длину машины.

Подобные данные для выбора размеров селсинов в настоящее время еще не получены.

Для приближенного выбора диаметра расточки статора селсинов на 50 гц можно рекомендовать следующие эмпирические формулы:

а) для бесконтактных селсинов и явнополюсных контактных селсинов

$$D \approx 1,7 \sqrt[4]{\frac{m_0}{k}}; \quad (36.12)$$

б) для неявнополюсных контактных селсинов

$$D \approx 1,8 \sqrt[4]{\frac{m_0}{k}}, \quad (36.13)$$

где m_0 — удельный момент при работе от однотипного селсина в гсм;

$k = \frac{l}{D}$ — отношение длины пакета статора к диаметру расточки.

Из формулы (36.12) следует, что как бесконтактные, так и контактные явнополюсные селсины при одинаковых m_0 и k будут иметь одинаковые размеры диаметров расточки статора. Однако при сравнении их между собой не следует забывать, что при одинаковых диаметрах расточки статора D и длине пакета статора l наружный диаметр D_k и длина корпуса l_k у бесконтактного селсина будут значительно больше, чем у контактного селсина.

Обычно имеем:

а) для бесконтактных селсинов

$$\frac{D_k}{D} = 2,2 \div 2,5; \quad \frac{l_k}{l} = 3,8 \div 4,2; \quad (36.14)$$

б) для контактных селсинов

$$\frac{D_k}{D} = 1,9 \div 2,1; \quad \frac{l_k}{l} = 2,8 \div 3,2. \quad (36.15)$$

Расчет селсинов включает расчет магнитной цепи, обмоток возбуждения и синхронизации, параметров по продольной и поперечной осям, определение рабочих характеристик $M = f(\theta)$ и потерь.

Расчет селсинов, так же как и расчет любой электрической машины, представляет собой задачу со многими решениями. Поэтому в каждом отдельном конкретном случае

нужно уметь подобрать такое решение, которое наиболее полно отвечает поставленным требованиям. Перед тем как начать расчет, необходимо сначала задаться определенными размерами, величинами, а затем уже производить вычисления. Если полученные результаты удовлетворяют поставленным требованиям, то на этом вычисления обычно заканчиваются, а если нет, то корректируются начальные данные и проводится новый расчет. Ниже приводится методика расчета магнитной цепи и параметров по продольной и поперечной осям селсина.

§ 37. РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ КОНТАКТНЫХ И БЕСКОНТАКТНЫХ СЕЛСИНОВ

Магнитные цепи контактных селсинов, имеющих различные конструктивные формы, как было показано в главе VI, хотя во многом и напоминают магнитные цепи синхронных и асинхронных машин, все же имеют свои особенности, что, естественно, сказывается при их расчетах. Так, например, селсины второй конструктивной формы по устройству магнитной цепи аналогичны явнополюсным синхронным машинам. Однако если первые имеют всегда только два полюса, очень маленький воздушный зазор, небольшой коэффициент полюсного перекрытия и т. д., то у вторых число полюсов больше двух, всегда очень большой воздушный зазор, значительный коэффициент полюсного перекрытия и т. д. Все это приводит к тому, что различные кривые для определения коэффициента полюсного перекрытия α_p , величины основной гармоники магнитного потока Φ_1 и т. д., применяемые при расчете магнитной цепи явнополюсных синхронных машин, не могут быть применены при расчете магнитной цепи селсинов.

Магнитная цепь бесконтактных селсинов имеет специфическое устройство с дополнительными воздушными зазорами и внешним магнитопроводом, которые не встречаются в других электрических машинах. Это также накладывает свои особенности на расчет их магнитной цепи.

Ниже приводятся расчеты магнитной цепи контактных селсинов второй и третьей конструктивной форм и бесконтактных селсинов. Расчет магнитной цепи контактных селсинов первой конструктивной формы не приводится, так как эти селсины в настоящее время не имеют применения.

При расчетах магнитной цепи любой электрической машины всегда ставится цель определить зависимость магнитного потока от магнитодвижущей силы обмотки возбуждения

$$\Phi = f(F_v).$$

При этом магнитная цепь разбивается на отдельные участки в пределах которых напряженность магнитного поля может

быть принята постоянной, и общая м. д. с. для каждого значения Φ находится по формуле

$$F_v = \sum H_n l_n$$

где H_n и l_n — напряженность поля и длина данного участка.

Расчет магнитной цепи обычно производится на пару полюсов.

Форма поля в явнополюсных селсинах резко отличается от синусоиды, а поэтому для них различают два магнитных потока:

Φ — действительный магнитный поток;

Φ_1 — первая гармоника магнитного потока Φ .

При расчете магнитной цепи принимается во внимание поток Φ , а при расчете обмотки синхронизации — поток Φ_1 . Вследствие этого при расчете магнитной цепи селсина определяются как Φ , так и Φ_1 .

А. Расчет магнитной цепи контактных селсинов

На рис. 118 и 119 были показаны магнитные цепи селсинов второй и третьей конструктивной форм. Там же указывались длины отдельных участков, на которые разбивается магнитная цепь при расчете. Найдем м. д. с. отдельных участков магнитной цепи.

1. Магнитодвижущая сила на воздушный зазор. Магнитодвижущая сила, необходимая для проведения магнитного потока через два воздушных зазора длиной δ , при максимальной индукции B_δ равна

$$F_\delta = \frac{2}{\mu_0} B_\delta \delta K_\delta, \quad (37.1)$$

где K_δ — коэффициент Картера, учитывающий наличие пазов на статоре и роторе. Значение K_δ определяется по формуле

$$K_\delta = K_{\delta_1} K_{\delta_2},$$

Величины K_{δ_1} и K_{δ_2} могут быть определены по эмпирическим формулам:

$$K_{\delta_1} = \frac{t_1 + 10\delta}{t_1 - b_{s1} + 10\delta}; \quad K_{\delta_2} = \frac{t_2 + 10\delta}{t_2 - b_{s2} + 10\delta}, \quad (37.2)$$

где t_1, t_2 — зубцевые деления статора и ротора.

b_{s1}, b_{s2} — ширина прорези паза статора и ротора.

Более точно величины K_{δ_1} и K_{δ_2} могут быть определены по формулам

$$K_{\delta_1} = \frac{t_1}{t_1 - \frac{b_{s1}^2}{5\delta + b_{s1}}}; \quad K_{\delta_2} = \frac{t_2}{t_2 - \frac{b_{s2}^2}{5\delta + b_{s2}}}. \quad (37.3)$$

Выражая B_δ в гауссах и подставляя значение магнитной проницаемости для пустоты μ_0 в формулу (37.1), для практического расчета получим:

$$F_\delta = 1,6 B_\delta \delta K_\delta. \quad (37.4)$$

Величина B_δ определяется по формуле

$$B_\delta = \frac{\Phi}{a_l l_l \tau} = \frac{\Phi}{b_l l_l}, \quad (37.5)$$

где

$$\alpha_l = \frac{b_l}{\tau};$$

b_l — теоретическая полюсная дуга;
 $l_l = \frac{l_1 + l_2}{2}$ — расчетная длина, равная полусумме длин пакетов статора и ротора.

Пакеты статоров и роторов селсинов, как правило, собираются без вентиляционных промежутков и отличаются по длине друг от друга на 1–2 мм.

Величина α_l зависит от распределения магнитной индукции в зазоре. Для явнополюсных селсинов форма поля может быть принята прямоугольной, а величина $b_l = b_n + 2\delta$, где b_n — действительная ширина полюсной дуги. Следовательно

$$\alpha_l = \frac{b_l}{\tau} = \frac{b_n + 2\delta}{\tau}. \quad (37.6)$$

Для уменьшения поперечного индуктивного сопротивления x_q величину α_l в явнополюсных селсинах второй конструктивной формы выбирают в пределах 0,4–0,5. Величина первой гармоники магнитной индукции будет равна

$$B_{o1} = \frac{4}{\pi} \int_{(1-\alpha_l)\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} B_\delta \sin x dx = \frac{4B_\delta}{\pi} \sin \alpha_l \frac{\pi}{2}.$$

Отсюда для первой гармоники магнитного потока получаем:

$$\Phi_1 = \frac{\pi}{2} B_{o1} \tau l_l = \frac{8}{\pi^2} B_\delta \tau l_l \sin \left(\alpha_l \frac{\pi}{2} \right).$$

Отношение действительного магнитного потока к потоку первой гармоники обозначим через k_Φ .

Определив величину Φ из (37.5), найдем

$$k_\Phi = \frac{\Phi}{\Phi_1} = \frac{\pi^2 \alpha_1}{8 \sin \frac{\alpha_1 \pi}{2}}. \quad (37.7)$$

В неявнополюсных селсинах, у которых магнитная цепь не насыщена, форма поля в воздушном зазоре может быть принята синусоидальной, а коэффициент полюсной дуги равным

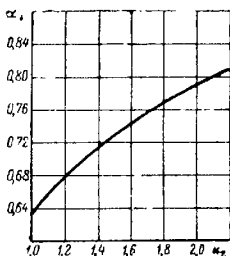
$$\alpha_1 = \frac{2}{\pi}. \quad (37.8)$$

В неявнополюсных селсинах, у которых магнитная цепь насыщена, форма поля отличается от синусоиды тем значительнее, чем больше коэффициент

$$k_z = 1 + \frac{F_{z1} + F_{z2}}{F_\delta}.$$

Зависимость α_1 от коэффициента k_z показана на рис. 154. Кривая α_1 определена в результате построения кривых полей ряда неявнополюсных машин.

Рис. 154. Зависимость α_1 от коэффициента k_z .



Для неявнополюсных селсинов величина первой гармоники магнитного потока может быть принята равной величине магнитного потока.

Магнитодвижущая сила F_δ обычно составляет основную часть общей м. д. с. магнитной цепи. Поэтому для уменьшения суммарной м. д. с. в первую очередь необходимо уменьшить величину F_δ , что при неизменной индукции может быть выполнено путем уменьшения воздушного зазора. Величина воздушного зазора в селсинах берется минимальной и определяется с учетом допусков на все детали так, чтобы было предотвращено соприкосновение ротора со статором при длительной эксплуатации в условиях тряски, вибрации и изменении окружающей температуры. При выборе величины воздушного зазора должны быть учтены: величина радиального зазора шарикоподшипников, эксцентриситет и эллиптичность ротора, статора и крышек.

Величина воздушного зазора с достаточной точностью может быть определена из формулы

$$\delta = \left(\frac{D}{200} + 0,005 \right) \text{ см}, \quad (37.9)$$

где D — внутренний диаметр статора, см.

2. Магнитодвижущая сила на зубцы статора и ротора

Магнитодвижущая сила на проведение магнитного потока через зону зубцов равна

$$F_z = 2l_z \cdot H_z, \quad (37.10)$$

где $2l_z$ — расчетная длина магнитной линии по зубцам;

H_z — напряженность поля, определяемая по основной кривой намагничивания (см. приложение 1).

Величина $2l_z$ равна:

а) для зубцов статора (см. рис. 118 и 119)

$$2l_z = D_{js} - D_1 + 0,33d_1; \quad (37.11)$$

б) для зубцов ротора (см. рис. 119)

$$2l_z = D_2 - D_3 + 0,33(d_2 + d_3); \quad (37.12)$$

в) для зубцов ротора (см. рис. 118)

$$2l_z = 0,66d_2. \quad (37.12')$$

Метод расчета индукции в зубцах зависит от степени насыщения зубцов. Если индукция $B_z < 18000$ гс, то считают, что весь поток проходит через зубец. В этом случае

$$B_z = \frac{k_z}{k_{ж}b_z} B_a, \quad (37.13)$$

где $k_{ж}$ — коэффициент заполнения пакета стали;

b_z — ширина зубца, которая равна:

а) у зубца статора (см. рис. 118 и 119)

$$b_z = \frac{1}{2} \left(D_1 \sin \frac{\pi}{z_1} - d_1 + \frac{[2\pi D_{js}]}{z_1} - b_n \right); \quad (37.14)$$

б) у зубца ротора (см. рис. 118)

$$b_z = D_2 \sin \frac{\alpha}{2} - d_1; \quad (37.15)$$

в) у зубца ротора (см. рис. 119)

$$b_z = \frac{1}{2} \left[(D_2 + D_3) \sin \frac{\pi}{z_2} - (d_1 + d_2) \right], \quad (37.16)$$

где z_1 и z_2 — число пазов статора и ротора; α — угол между пазами.

Если индукция $B_z > 18000$ гс, то необходимо учитывать поток, проходящий через паз. Величину этого потока обычно определяют графическим путем. Так как в селсинах в большинстве случаев зубцы не имеют большого насыщения ($B_z < 18000$ гс), метод расчета B_z с учетом прохождения потока через пазы не приводится.

3. Магнитодвижущая сила на ярмо статора и ротора

Магнитодвижущая сила по проведению магнитного потока через ярмо равна

$$F_j = l_j \cdot H_j, \quad (37.17)$$

где l_j — длина магнитной линии по ярму, которая равна:

а) для статора (см. рис. 118 и 119)

$$l_j = \frac{\pi}{4} (D_{as} + D_{js}); \quad (37.18)$$

б) для ротора (см. рис. 119)

$$l_j = \frac{\pi}{4} (D_{jr} + D_{ir}); \quad (37.19)$$

в) для ротора (см. рис. 118)

$$l_j = \frac{\pi}{4} (D_{jr} + D_{ir}) - 0,5 b_m; \quad (37.20)$$

H_j — напряженность поля в ярме, которая определяется:

а) для ярма ротора (рис. 118) по основной кривой намагничивания $H = f(B)$;

б) для ярма ротора (рис. 119), а также для ярма статора (рис. 118 и 119) по кривой $H_j = f_1(B_j)$ (см. приложение 2).

Величина индукции в ярме находится по формулам:

а) в ярме статора (рис. 118 и 119)

$$B_j = \frac{\alpha_r \tau}{(D_{as} - D_{js}) k_{ж}} B_{\delta}; \quad (37.21)$$

б) в ярме ротора (рис. 118 и 119)

$$B_j = \frac{\alpha_r \tau}{(D_{jr} - D_{ir}) \cdot k_{ж}} B_{\delta}, \quad (37.22)$$

где D_{jr} — диаметр ярма ротора.

Б. Расчет магнитной цепи бесконтактных селсинов

Устройство магнитной цепи бесконтактных селсинов и длины отдельных участков магнитной цепи указаны на рис. 155. Магнитная цепь бесконтактных селсинов разбивается на следующие участки: основной зазор δ_1 , зубцы статора, ярмо статора, магнитопровод ротора, дополнительный воздушный зазор δ_2 , кольцеобразные сердечники и внешний магнитопровод.

В бесконтактных селсинах различают магнитные потоки:

Φ — действительный поток, проходящий через воздушный зазор δ_1 ;

Φ_1 — первая гармоника магнитного потока Φ ;

Φ_s — поток рассеяния между двумя магнитопроводами ротора;

Φ_m — поток возбуждения, равный $\Phi_m = \Phi + \Phi_s$.

На рис. 156 представлена эквивалентная схема магнитной цепи бесконтактного селсина. На этой схеме сопротивления отдельных участков магнитной цепи заменены электрическими сопротивлениями, магнитодвижущая сила катушек возбуждения — электродвижущей силой двух элементов, а магнитные потоки — электрическими токами.

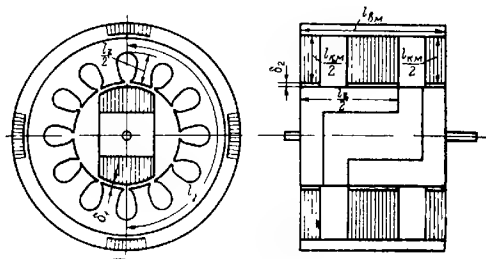


Рис. 155. Магнитная цепь бесконтактного селсина.

На схеме обозначены:

R_{i_1} — магнитное сопротивление основного воздушного зазора;

R_z — магнитное сопротивление зубцов статора;

R_f — магнитное сопротивление ярма статора;

R_{i_2} — магнитное сопротивление дополнительного воздушного зазора;

R_k — магнитное сопротивление кольцевых магнитопроводов;

R_r — магнитное сопротивление магнитопровода ротора;

$R_{в. м}$ — магнитное сопротивление стержней внешнего магнитопровода;

R_0 — магнитное сопротивление промежутка между статором и стержнями внешнего магнитопровода;

R_s — магнитное сопротивление между магнитопроводами ротора.

Ток I соответствует потоку Φ , ток I_s — потоку Φ_s и ток I_m — потоку Φ_m .

Из рис. 156 видно, что в силу симметрии схемы, т. е. равенства сопротивлений и э. д. с., включенных в левую и правую половины схемы, ток через сопротивление R_0 будет равен нулю. Это означает, что в реальном селсине, при симметрии магнитной цепи и равенстве м. д. с. катушек возбуждения,

магнитный поток, проходящий через воздушный зазор между статором и стержнями внешнего магнитопровода, будет равен нулю.

В соответствии с эквивалентной схемой расчет магнитной цепи бесконтактных селсинов можно разделить на следующие этапы:

1. Расчет участка $1-2-4$, охватывающего основные зазоры δ_1 , зубцы и ярмо статора, и определение зависимости

$$\Phi = f(F_{\delta_1} + F_z + F_j).$$

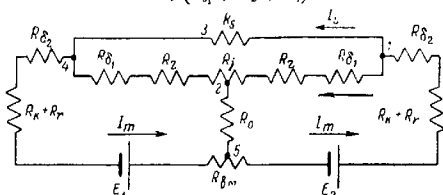


Рис. 156. Эквивалентная схема магнитной цепи бесконтактного селсина.

2. Расчет участка $1-3-4$, охватывающего промежуток между двумя магнитопроводами ротора. При этом определяется проводимость λ_s и поток рассеяния

$$\Phi_s = \lambda_s (F_{\delta_1} + F_z + F_j).$$

3. Определение магнитного потока

$$\Phi_m = \Phi + \Phi_s = f(F_{\delta_1} + F_z + F_j).$$

4. Расчет участка $4-5-1$, охватывающего магнитопроводы ротора, дополнительные зазоры, кольцевые магнитопроводы и стержни внешнего магнитопровода. Определение зависимости $\Phi = f(\sum F)$.

Расчет характеристики $\Phi = f(F_{\delta_1} + F_z + F_j)$ производится так же, как у контактных явнополусных селсинов. Расчет магнитного напряжения воздушного зазора F_{δ_1} , зубцов статора F_z и ярма статора F_j производится, соответственно, по формулам (37.4), (37.10) и (37.17). Коэффициент полюсной дуги бесконтактных селсинов обычно выбирается в пределах $\alpha_l = 0,45 \div 0,55$. Величина воздушного зазора, как и у контактных селсинов, выбирается минимальной, так как намагничивающая сила для проведения потока через воздушные зазоры в бесконтактных селсинах из-за наличия дополнительных зазоров имеет еще большее значение, чем в контактных селсинах. Величины

воздушных зазоров могут быть определены ориентировочно, согласно уравнению (37.9).

Проводимость между двумя магнитопроводами ротора определяется, как правило, графически, так как из-за сложной формы очертания внутренних поверхностей магнитопроводов аналитический расчет весьма затруднен.

Определение проводимости λ_s производится при помощи построения магнитного поля и расчета проводимости отдельных силовых трубок. Общая проводимость, равная сумме проводимостей отдельных трубок, находится по формуле

$$\lambda_s = \sum_{k=1}^n 0,4\pi \frac{b_k}{l_k} b_r, \quad (37.23)$$

где b_k — средняя ширина элементарной трубки;
 l_k — длина элементарной трубки;
 b_r — ширина магнитопровода ротора.

На рис. 157 показан пример построения магнитного поля. При построении поля проводимость магнитопроводов ротора принимается бесконечно большой, вследствие чего силовые линии должны выходить из магнитопровода перпендикулярно к поверхности.

Практически при построении картины поля удобнее строить силовые линии так, чтобы все они имели одинаковое отно-

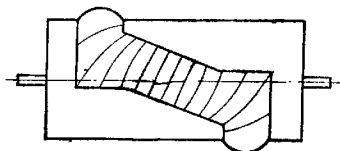


Рис. 157. Картина поля между магнитопроводами ротора.

шение ширины к длине, т. е. $\frac{b_k}{l_k} = \text{const}$. В этом случае для определения суммарной проводимости достаточно проводимость одной трубки умножить на число трубок.

Определив проводимость потоков рассеяния λ_s , легко построить характеристику зависимости потока Φ_s от м. д. с., действующей между двумя половинами ротора. Как видно из эквивалентной схемы, м. д. с., действующая между двумя магнитопроводами ротора, равна $F_{\delta_1} + F_z + F_j$.

Необходимо подчеркнуть, что приведенный расчет потока рассеяния относится к тому случаю, когда промежуток между двумя магнитопроводами заполнен неэлектропроводным материалом. В случае заполнения этого промежутка электропроводным материалом, например силумином, поток рассеяния демпфируется и его величина уменьшается особенно при повышенной частоте питания.

Определение магнитного потока $\Phi_m = \Phi + \Phi_s$ произво-

дится графическим путем. Для этого на одном и том же графике строятся характеристики $\Phi = f(F_{\delta_1} + F_z + F_j)$, $\Phi_s = \lambda_s (F_{\delta_1} + F_z + F_j)$ и находится суммарная кривая $\Phi_m = f(F_{\delta_1} + F_z + F_j)$ при помощи сложения ординат кривых Φ и Φ_s . Способ определения характеристики $\Phi_m = \Phi + \Phi_s$ показан на рис. 158. Как видно из этого рисунка, с увеличением насыщения зубцов

и яра статора увеличивается коэффициент рассеяния

$$\sigma_1 = \frac{\Phi_s}{\Phi}, \quad (37.24)$$

так как с увеличением м. д. с. Φ_s растет линейно, а Φ растет медленнее.

При проектировании магнитной цепи бесконтактных селсинов следует стараться по возможности уменьшить коэффициент рассеяния. Это достигается путем уменьшения величины проводимости между магнитопроводами ротора посред-

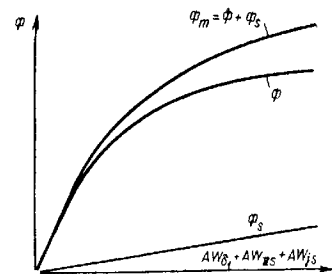


Рис. 158. Зависимость $\Phi_m = \Phi + \Phi_s = f(F_{\delta_1} + F_z + F_j)$.

ством максимального их удаления друг от друга. Величину коэффициента рассеяния не удастся получить ниже $\sigma_1 = 0,08 \div 0,15$. Малое значение этого коэффициента удастся получить у таких роторов, у которых промежуток между двумя магнитопроводами заполнен электропроводным материалом, а большее значение — у роторов, у которых промежуток между магнитопроводами заполнен изоляционным материалом. Расчет участка 4—5—I производится путем разбивки его на отдельные части и расчета м. д. с. отдельных частей.

Участок разбивается на следующие части: магнитопроводы ротора, дополнительные воздушные зазоры, кольцевые сердечники и стержни внешнего магнитопровода.

М. д. с., необходимая для проведения магнитного потока через магнитопроводы ротора,

$$F_r = l_r H_r, \quad (37.25)$$

где $\frac{l_r}{2}$ — длина магнитной линии по одному магнитопроводу ротора (в качестве величины $\frac{l_r}{2}$ приближенно может быть взята длина пластины ротора, как это указано на рис. 155);

H_r — напряженность поля, определяемая по основной кривой намагничивания стали $H = f(B)$ (см. приложение 1).

Индукция в магнитопроводе ротора подсчитывается по формуле

$$B_r = \frac{\Phi_m}{S_r}, \quad (37.26)$$

где S_r — поперечное сечение магнитопровода ротора, которое берется по середине промежутка между боковой поверхностью статора и кольцевым сердечником.

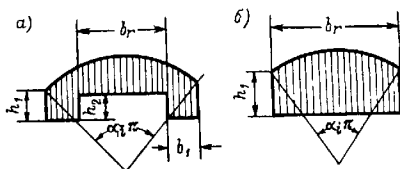


Рис. 159. Сечение ротора бесконтактного селсина:
а — набор из пластин двух конфигураций; б — набор из пластин одной конфигурации.

Для ротора, набираемого из пластин двух конфигураций (см. рис. 159, а), имеем

$$S_r = k_{\text{ж}} \left[\frac{D_r^2}{8} (\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi) + h_1 (2b_1 + b_r) - h_2 b_r \right], \quad (37.27)$$

где

h_1 и b_1 — высота и ширина боковых пакетов ротора;
 h_2 и b_r — глубина и ширина углубления центральной части пакета ротора.

Иногда пакет ротора собирается из пластин одинаковой конфигурации, как это показано на рис. 159, б. В этом случае сечение магнитопровода ротора может быть определено из формулы

$$S_r = k_{\text{ж}} \left[\frac{D_r^2}{8} (\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi) + h_1 b_r \right], \quad (37.27')$$

где D_r — наружный диаметр ротора;
 h_1 — высота крайней пластины ротора;
 b_r — ширина пакета ротора.

С целью уменьшения момента инерции ротора сечение магнитопроводов следует брать минимальной величины, хотя при этом и получаются максимальные индукции.

Магнитодвижущая сила для проведения магнитного потока через дополнительные зазоры

$$F_{\delta_2} = 1,6 B_{\delta_2} \delta_2, \quad (37.28)$$

где δ_2 — воздушный зазор между кольцевыми магнитопроводом и ротором. Обычно статор и кольцевые магнитопроводы имеют одинаковый внутренний диаметр и $\delta_2 = \delta_1$;

B_{δ_2} — магнитная индукция в дополнительном воздушном зазоре.

Величина индукции B_{δ_2} для роторов без торцевых пакетов находится по формуле

$$B_{\delta_2} = \frac{\Phi_m}{2,4 \pi D_r (b_k + 2\delta_2)}, \quad (37.29)$$

а для роторов с торцевыми пакетами

$$B_{\delta_2} = \frac{\Phi_m}{0,9 \pi D_r (b_k + 2\delta_2)}, \quad (37.30)$$

где b_k — ширина кольцевых магнитопроводов.

В последней формуле коэффициент 0,9 позволяет учитывать неравномерность индукции в зазоре δ_2 , что является следствием наличия воздушного промежутка между магнитопроводами ротора и торцевыми пакетами.

Ширину кольцевых магнитопроводов b_k выбирают таким образом, чтобы м.д.с. дополнительного зазора δ_2 была приблизительно такой же величины, что и м.д.с. основного зазора.

Магнитодвижущая сила на проведение магнитного потока через кольцевые магнитопроводы

$$F_{\kappa,м} = 2l_{\kappa,м} H_{\kappa,м}, \quad (37.31)$$

где $l_{\kappa,м}$ — длина магнитной линии по кольцевому магнитопроводу;

$H_{\kappa,м}$ — средняя напряженность поля в кольцевом магнитопроводе. Величина $H_{\kappa,м}$ определяется по основной кривой намагничивания $H = f(B)$ (см. приложение 1). Можно считать

$$2l_{\kappa,м} = D_{\kappa_1} - D_{\kappa_2}; \quad (37.32)$$

$$B_{\kappa,м} = \frac{2\Phi_m}{\pi (D_{\kappa_1} + D_{\kappa_2}) b_{\kappa} k_{ж}}, \quad (37.33)$$

где D_{κ_1} и D_{κ_2} — наружный и внутренний диаметры кольцевого магнитопровода.

Сравнивая формулу (37.33) с формулами (37.29) и (37.30), нетрудно увидеть, что $B_{\kappa,м} < B_{\delta_2}$, так как $D_{\kappa_2} > D_r$ и $D_{\kappa_1} > D_r$.

Поэтому $F_{к,м}$ обычно имеет небольшую величину. Во многих случаях величиной $F_{к,м}$ можно пренебречь.

Магнитодвижущая сила на проведение магнитного потока через внешний магнитопровод

$$F_{в,м} = l_{в,м} H_{в,м}, \quad (37.34)$$

где $l_{в,м}$ — длина стержня внешнего магнитопровода;

$H_{в,м}$ — напряженность поля в стержнях внешнего магнитопровода, которая определяется по основной кривой намагничивания $H = f(B)$ (см. приложение 1).

Величина индукции в стержнях внешнего магнитопровода определяется по формуле:

$$B_{в,м} = \frac{\Phi_m}{S_{в,м}} = \frac{\Phi_m}{n h b k_{ж}}, \quad (37.35)$$

где n — количество стержней внешнего магнитопровода;
 h и b — высота и ширина одного стержня внешнего магнитопровода.

§ 38. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СЕЛСИНОВ ПО ПРОДОЛЬНОЙ И ПОПЕРЕЧНОЙ ОСЯМ

Для расчета удельного момента m_0 , синхронизирующего момента M , демпферного момента T_D , времени затухания $t_{зат}$ и т. д. необходимо знать параметры селсина по продольной оси r'_d , x'_d и по поперечной оси r'_q и x'_q . Эти параметры оказывают существенное влияние на все характеристики селсинов. От правильного выбора их величин зависит качество селсинов. Поэтому умение рассчитывать параметры селсина по поперечной и продольной осям имеет большое практическое значение. Можно смело сказать, что точность расчета всех характеристик селсинов зависит от того, с какой точностью могут быть рассчитаны параметры r'_d , x'_d , r'_q и x'_q .

Расчет этих параметров удобнее всего вести по эквивалентным схемам продольной и поперечной оси, которые были установлены в § 10 и показаны на рис. 48 и 49. В настоящем параграфе показано, как определять все величины, входящие в состав эквивалентных схем, по геометрическим размерам селсинов и их обмоточным данным.

А. Расчет параметров явнополюсных контактных селсинов по продольной оси $z'_d = r'_d + jx'_d$

Расчет параметров по продольной оси производится согласно эквивалентной схеме (см. рис. 48), в которую входят следующие величины: r , x_s — омическое сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния одной фазы обмотки син-

хронизации; x_{ad} — индуктивное сопротивление фазы обмотки синхронизации по продольной оси; r'_f и x'_{fs} — омическое сопротивление обмотки возбуждения и индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, приведенные к фазе обмотки синхронизации.

Способ расчета r и x_s здесь не приводится, так как он общеизвестен.

Величина x_{ad} определяется по формуле (см. [29]),

$$x_{ad} = 4,8 \cdot 10^{-8} f \frac{l\tau}{\delta'} A_{d1} (\omega_2 k_{w_2})^2, \quad (38.1)$$

где $\delta' = \delta_0 k_\delta \frac{\Sigma F}{F_\delta}$ — эквивалентный воздушный зазор с учетом м. д. с. стали и коэффициента Картера, $сМ$;

$A_{d1} = \alpha_i + \frac{\sin \alpha_i \pi}{\pi}$ (38.2) — отношение первой гармоники поля реакции обмотки синхронизации по продольной оси к максимальной индукции того же поля при равномерном зазоре; l, τ — длина и полюсное деление статора (или ротора), $сМ$; $\omega_2 k_{w_2}$ — эффективное число витков обмотки синхронизации.

Величины r'_f и x'_{fs} определяются по формулам (10.3):

$$\begin{aligned} r'_f &= \frac{2}{3} \left(\frac{x_{ad}}{x_{af}} \right)^2 r_f; \\ x'_{fs} &= \frac{2}{3} \left(\frac{x_{ad}}{x_{af}} \right)^2 x_{fs} + x_{ad} \left(\frac{2}{3} \frac{x_{ad}}{x_{af}} \frac{x_{fd}}{x_{af}} - 1 \right). \end{aligned} \quad (38.3)$$

В последней формуле первый член представляет собой приведенное индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, а второй член — дифференциальное рассеяние той же обмотки.

Величина x_{af} может быть определена по формуле

$$x_{af} = 0,4\pi^2 \cdot 10^{-8} f \alpha_i \frac{\tau l}{\delta'} \frac{\omega_1 \omega_2 k_{w_2}}{k_\Phi}. \quad (38.4)$$

Из (38.1) и (38.4) легко определить отношение

$$\frac{x_{ad}}{x_{af}} = \frac{3}{2} \frac{0,808 A_{d1} k_\Phi}{\alpha_i} \frac{\omega_2 k_{w_2}}{\omega_1} = \frac{3}{2} \frac{\omega_2 k_{w_2}}{\omega_1 k_1}, \quad (38.5)$$

где

$$k_1 = \frac{\alpha_i}{0,808 A_{d1} k_\Phi}.$$

Подставляя сюда значения k_Φ из (37.7) и A_{d1} из (38.2), получим

$$k_1 = \frac{\sin \frac{\alpha_i \pi}{2}}{0,101 \pi (\alpha_i \pi + \sin \alpha_i \pi)}. \quad (38.5')$$

Принимая во внимание (38.5), выражения (38.3) запишем в виде:

$$\left. \begin{aligned} r'_f &= \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k w_2}{w_1 k_1} \right)^2 r_f \\ x'_{fs} &= \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k w_2}{w_1 k_1} \right)^2 x_{fs} + \left(\frac{k_\Phi}{k_1} - 1 \right) x_{ad} \end{aligned} \right\}. \quad (38.6)$$

После того как определены величины r , x_s , x_{ad} , r'_f и x'_{fs} , по эквивалентной схеме легко найти параметры r'_d и x'_d :

$$\left. \begin{aligned} r'_d &= r + \frac{x_{ad}^2 r'_f}{r_f^2 + (x_{ad} + x'_{fs})^2} \\ x'_d &= x_s + \frac{x_{ad} [r_f^2 + x'_{fs} (x_{ad} + x'_{fs})]}{r_f^2 + (x_{ad} + x'_{fs})^2} \end{aligned} \right\}. \quad (38.7)$$

Б. Расчет параметров явнополюсных контактных селсинов по поперечной оси $\dot{z}'_q = r'_q + jx'_q$.

Расчет параметров по поперечной оси явнополюсных селсинов с демпферной обмоткой можно производить по эквивалентной схеме (см. рис. 49, б).

В этой схеме r и x_s представляют собой омическое и индуктивное сопротивления рассеяния фазы обмотки синхронизации, x_{aq} — индуктивное сопротивление фазы обмотки синхронизации по поперечной оси, r'_k и x'_{ks} — активное и индуктивное сопротивления демпферной обмотки, приведенные к фазе обмотки синхронизации. В случае отсутствия демпферной обмотки на эквивалентной схеме необходимо исключить ветвь с r'_k и x'_{ks} .

Установим связь параметров, входящих в эквивалентную схему, с геометрическими размерами и обмоточными данными селсинов. Величина x_{aq} определяется из известной формулы (см. [29])

$$x_{aq} = 4,8 \cdot 10^{-8} f \frac{l\tau}{\delta''} A_{q1} (w_2 k w_2)^2, \quad (38.8)$$

где

$$\delta'' = \delta_0 k_\delta \frac{F_\delta + F_{z_1} + F_{z_2}}{F_\delta} - \text{эквивалентный воздушный зазор}$$

с учетом м.д.с. зубцов статора,
зубцов ротора и коэффициента
Картера;

$A_{q1} = \alpha_l - \frac{\sin \alpha_l \pi}{\pi} - (38.9)$ отношение амплитуды первой гармоники кривой поля реакции обмотки синхронизации по поперечной оси к максимальной индукции при равномерном зазоре.

Расчет приведенных параметров демпферной обмотки производится по формулам (10.8). Определим параметры демпферной обмотки для случая, когда эта обмотка состоит из двух контуров (катушек). Селсины с подобной обмоткой нашли довольно широкое распространение на практике.

Обозначим через r_k , x_{ks} и w_k омическое сопротивление, индуктивное сопротивление рассеяния и число витков одной катушки демпферной обмотки. Тогда приведенные к фазе обмотки синхронизации сопротивления демпферной обмотки будут равны по формуле (10.8):

$$\left. \begin{aligned} r'_k &= \frac{2}{3} \left(\frac{x_{aq}}{x_{ak}} \right)^2 \frac{r_{k1}}{2} \\ x'_{ks} &= \frac{2}{3} \left(\frac{x_{aq}}{x_{ak}} \right)^2 \frac{x_{ks}}{2} + x_{aq} \left(\frac{2}{3} \frac{x_{aq}}{x_{ak}} \frac{x_{kq}}{x_{ak}} - 1 \right) \end{aligned} \right\}. \quad (38.10)$$

В последней формуле второй член представляет собой индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния демпферной обмотки, которое может вследствие небольшого количества катушек демпферной обмотки достигать довольно большой величины по сравнению с индуктивным сопротивлением рассеяния. Для приведения (38.10) к более удобному виду воспользуемся выражениями

$$x_{kq} = 0,4\pi^2 \cdot 10^{-8} f \frac{2\alpha}{3} \frac{l\tau}{\delta_0'} w_k^2; \quad (38.11)$$

$$\frac{x_{kq}}{x_{ak}} = \frac{w_k k_q}{w_2 k_{w_2}},$$

где

x_{kq} — индуктивное сопротивление самоиндукции демпферного контура;

x_{ak} — индуктивное сопротивление взаимной индукции фазы обмотки синхронизации и демпферного контура по поперечной оси.

Выражение для x_{kq} легко получить из (37.39) заменой α на $\frac{2}{3}\alpha$, w_1 на w_k , δ' на δ'' .

Пользуясь формулами (38.8), (38.11), можно определить отношение

$$\frac{x_{aq}}{x_{ak}} = \frac{3}{2} \frac{w_2 k_{w_2}}{w_k k_2}, \quad (38.12)$$

где

$$k_2 = \frac{\alpha}{1,212 A_{q1} k_q}.$$

В последнем выражении k_q представляет собой отношение полного потока демпферного контура к потоку первой гармоники для рассматриваемого нами случая.

На рис. 160 представлен действительный поток Φ_k и первая гармоника индукции B_{k1} для демпферной обмотки с двумя контурами; из рисунка видно, что

$$\Phi_k = \frac{2}{3} \alpha_1 \tau B_k l; \quad \Phi_{k1} = \frac{2}{\pi} B_{k1} \tau l.$$

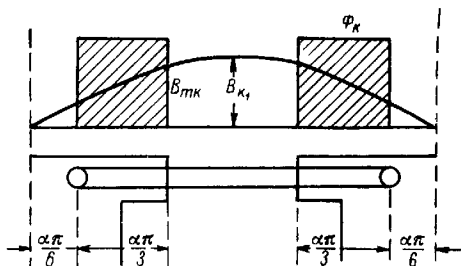


Рис. 160. Магнитное поле демпферного контура.

Найдем первую гармонику кривой поля B_{k1} . Амплитуда основной гармоники будет равна

$$B_{k1} = \frac{4}{\pi} \int_{\frac{\alpha_1 \pi}{6}}^{\frac{\alpha_1 \pi}{2}} B_R \sin x dx = \frac{8}{\pi} \sin \frac{\alpha_1 \pi}{3} \sin \frac{\alpha_1 \pi}{6}.$$

и так получим

$$k_q = \frac{\Phi_k}{\Phi_{k1}} = \frac{\pi^2}{24} \frac{\tau_l}{\sin \frac{\alpha_1 \pi}{3} \sin \frac{\alpha_1 \pi}{6}}. \quad (38.13)$$

Теперь, пользуясь выражениями (38.12), (38.11), можно привести выражения (38.10) к более удобному для расчета виду:

$$\left. \begin{aligned} r'_k &= \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w2}}{w_k k_2} \right)^2 \frac{r_A}{2} \\ x'_{ks} &= \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w2}}{w_k k_2} \right)^2 \frac{x_{ks}}{2} + x_{aq} \left(\frac{k_q}{k_2} - 1 \right) \end{aligned} \right\}. \quad (38.14)$$

Полученные формулы позволяют определить параметры селсина по поперечной оси:

$$\left. \begin{aligned} r'_q &= r + \frac{x_{aq}^2 r'_k}{r_k'^2 + (x_{aq} + x'_{ks})^2} \\ x'_q &= x_s + \frac{x_{aq} [r_k'^2 + x'_{ks} (x_{aq} + x'_{ks})]}{r_k'^2 + (x_{aq} + x'_{ks})^2} \end{aligned} \right\} \quad (38.15)$$

В приведенном методе расчета параметров селсина по продольной и поперечной осям мы пренебрегали потерями в стали, что может привести в некоторых случаях к значительным ошибкам. Величина этой ошибки зависит, в основном, от частоты сети. При частоте сети 50 гц потери для селсинов невелики и ошибка небольшая. При повышенных частотах (400 + 500 гц) потери в стали имеют значительную величину и ошибка может достигать до 20 + 30%. Особенно важно учитывать потери в стали при подсчете параметров r'_d и r'_q . Поэтому при расчете параметров по продольной и поперечной осям при повышенной частоте сети следует пользоваться выражениями (10.13) и (10.14).

В. Расчет параметров неявнополюсных селсинов по продольной оси

В неявнополюсных селсинах, в отличие от явнополюсных, все обмотки (возбуждения, демпферная и обмотка синхронизации) всегда выполняются распределенными. Обмотки демпферная и возбуждения могут быть конструктивно выполнены в двух вариантах: а) в виде двух однофазных обмоток, оси которых смещены на 90°; б) в виде одной трехфазной обмотки, две параллельно соединенные фазы которой являются обмоткой возбуждения, а третья, закороченная — демпферной обмоткой.

В первом случае функции обмоток будут строго разграничены, т. е. обмотка возбуждения будет действовать только по продольной оси, а обмотка демпферная — только по поперечной оси. Во втором случае, как было показано на рис. 132, не будет строгого разграничения между функциями различных обмоток: обмотка возбуждения по продольной оси будет представлять две обмотки, включенные параллельно, так как э. д. с., индуцированные продольным потоком в фазах, будут направлены по контуру навстречу; по поперечной оси обмотка возбуждения будет представлять короткозамкнутую обмотку, так как э. д. с., индуцируемые в фазах поперечным потоком, будут включены согласно и вызовут появление тока.

Демпферная обмотка, как и в первом случае, будет действовать только по поперечной оси. Второй вариант выполнения обмоток, как это уже говорилось ранее, является более выгодным; он всегда применяется в тех случаях, когда необходимо иметь небольшие сопротивления по поперечной оси. Схема включения обмоток при этом варианте выполнения показана на рис. 142.

Благодаря тому, что все обмотки выполнены распределенными с достаточной для практики точностью, можно принять, что м. д. с., создаваемые ими, синусоидальны и дифференциальное рассеяние равно нулю.

Расчет параметров неявнополюсных селсинов по продольной оси можно производить так же, как и для явнополюсных селсинов, по эквивалентной схеме (рис. 48). При расчете параметров эквивалентной схемы следует учитывать форму выполнения обмоток.

Для первого варианта с двумя однофазными обмотками имеем:

$$r_f = r_b; \quad x_{fs} = x_{bs};$$

$$x_{ad} = 4,8 \cdot 10^{-8} f \frac{l\tau}{\delta} (\omega_2 k_{w2})^2; \quad (38.16)$$

$$x_{fd} = 3,2 \cdot 10^{-8} f \frac{l\tau}{\delta} (\omega_b k_{wb})^2 = \frac{2}{3} x_{ad} \left(\frac{\omega_b k_{wb}}{\omega_2 k_{w2}} \right)^2; \quad (38.17)$$

$$\frac{x_{fd}}{x_{ad}} = \frac{\omega_b \cdot k_{wb}}{\omega_2 \cdot k_{w2}}, \quad (38.18)$$

где r_b , x_{bs} — омическое и индуктивное сопротивления рассеяния обмотки возбуждения;

ω_b и k_{wb} — число витков и обмоточный коэффициент обмотки возбуждения.

Формулы для расчета приведенных параметров примут вид

$$\left. \begin{aligned} r'_f &= \frac{3}{2} \left(\frac{\omega_2 \cdot k_{w2}}{\omega_b \cdot k_{wb}} \right)^2 r_b \\ x'_{fs} &= \frac{3}{2} \left(\frac{\omega_2 \cdot k_{w2}}{\omega_b \cdot k_{wb}} \right)^2 x_{bs} \end{aligned} \right\}. \quad (38.19)$$

Для второго варианта выполнения обмоток будем иметь:

$$r_f = \frac{r_\Phi}{2}; \quad x_{fs} = \frac{x_\Phi}{2}.$$

x_{ad} определяется по (38. 16)

$$x_{fd} = 2,4 \cdot 10^{-8} f \frac{l}{8'} (w_{\phi} k_{w\phi})^2 = \frac{1}{2} x_{ad} \left(\frac{w_{\phi} \cdot k_{w\phi}}{w_2 \cdot k_{w_2}} \right)^2; \quad (38. 20)$$

$$\frac{x_{fd}}{x_{af}} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{w_{\phi} k_{w\phi}}{w_2 k_{w_2}}, \quad (38. 21)$$

где r_{ϕ} и $x_{\phi s}$ — омическое и индуктивное сопротивления одной фазы обмотки синхронизации;
 w_{ϕ} и $k_{w\phi}$ — число витков и обмоточный коэффициент одной фазы трехфазной обмотки.

Формулы для расчета приведенных параметров примут вид:

$$\left. \begin{aligned} r'_f &= \left(\frac{w_2 k_{w_2}}{w_{\phi} k_{w\phi}} \right)^2 r_{\phi} \\ x'_{fs} &= \left(\frac{w_2 k_{w_2}}{w_{\phi} k_{w\phi}} \right)^2 x_{\phi s} \end{aligned} \right\}. \quad (38. 22)$$

Дальнейший расчет параметров производится так же, как и для явнополюсных селсинов, по формулам (38. 7).

Г. Расчет параметров неявнополюсных селсинов по поперечной оси

Расчет параметров по поперечной оси селсинов с двумя взаимноперпендикулярными однофазными обмотками, в силу симметричности магнитной цепи по продольной и поперечной осям, можно производить по тем же формулам, что и для продольной оси (38. 19), заменяя r_b , x_{bs} и w_b , k_{wb} на r_{κ} , $x_{\kappa s}$ и w_{κ} , $k_{w_{\kappa}}$. После такой замены получим:

$$\left. \begin{aligned} r'_{\kappa} &= \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w_2}}{w_{\kappa} k_{w_{\kappa}}} \right)^2 r_{\kappa} \\ x'_{\kappa s} &= \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w_2}}{w_{\kappa} k_{w_{\kappa}}} \right)^2 x_{\kappa s} \end{aligned} \right\}, \quad (38. 23)$$

где r_{κ} и $x_{\kappa s}$ — омическое и индуктивное сопротивления рассеяния демпферной обмотки;

w_{κ} и $k_{w_{\kappa}}$ — число витков и обмоточный коэффициент демпферной обмотки.

Расчет параметров по поперечной оси селсинов с демпферной обмоткой, состоящей из накоротко замкнутой одной фазы трехфазной обмотки, в силу симметрии продольной и поперечной осей, можно производить также по формулам для продольной оси. В поперечной оси этих селсинов оказы-

ваются две обмотки — демпферная и обмотка возбуждения. Последняя состоит из двух фаз, включенных последовательно и накоротко замкнутых (см. рис. 132, в). Очевидно, что воздействие обмотки возбуждения на поперечную ось не изменилось бы, если каждую из фаз самостоятельно замкнуть накоротко. Поэтому при расчете параметров по поперечной оси все фазы трехфазной обмотки, из которой состоят обмотки возбуждения и демпферная, могут быть приняты как замкнутые накоротко.

В этом случае параметры r'_k и x'_{ks} могут быть определены из следующих формул:

$$\left. \begin{aligned} r'_k &= \left(\frac{w_s k w_2}{w_\phi k w_\phi} \right)^2 r_\phi \\ x'_{ks} &= \left(\frac{w_s k w_2}{w_\phi k w_\phi} \right)^2 x_{\phi s} \end{aligned} \right\}, \quad (38.24)$$

где r_ϕ и $x_{\phi s}$ — омическое и индуктивное сопротивления фазы трехфазной обмотки;

w_ϕ и k_{w_ϕ} — число витков и обмоточный коэффициент одной фазы трехфазной обмотки.

Расчет параметров r'_q и x'_q по поперечной оси можно производить по формулам (38.15).

Учитывая, что для неявнополюсных селсинов $x_{aq} = x_{ad}$, величина x_{aq} может быть определена по формуле (38.16).

Д. Расчет параметров бесконтактных селсинов.

При расчете параметров контактных селсинов по продольной оси мы пользовались эквивалентной схемой (см. рис. 48), куда, кроме x_{ad} , входят омические и индуктивные сопротивления рассеяния фазы обмотки синхронизации и обмотки возбуждения. При расчете параметров бесконтактных селсинов по продольной оси, кроме этих величин, в эквивалентную схему необходимо ввести дополнительные элементы, которые бы позволили учитывать поток рассеяния между двумя магнитопроводами ротора.

Для определения параметров бесконтактных селсинов по продольной оси воспользуемся эквивалентной схемой магнитной цепи (см. рис. 156). Из этой схемы видно, что при подаче питания на обмотку возбуждения в селсине возникают: поток взаимной индукции Φ , поток рассеяния Φ_s , полный поток обмотки возбуждения Φ_m . Поток Φ определяет величину x_{fd} , а поток Φ_s создает дополнительное индуктивное сопротивление обмотки возбуждения.

Для явнополюсных синхронных машин имеем

$$x_{fd} = 0,4\pi^2 \cdot 10^{-8} f a_i \frac{l_\tau}{\delta} w_1^2.$$

Принимая во внимание эквивалентную схему (см. рис. 156), для бесконтактных селсинов получим

$$\left. \begin{aligned} x_{fd} &= 0,4\pi^2 \cdot 10^{-8} f z_1 \frac{l\tau}{\delta_1''} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \frac{\lambda_s}{\lambda_2}} \omega_1^2 \\ x_{fs_2} &= 0,8\pi^2 \cdot 10^{-8} f \lambda_s \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \frac{\lambda_s}{\lambda_2}} \omega_1^2 = x_{fd} \sigma_1 \end{aligned} \right\}, \quad (38.25)$$

где

$$\delta_1'' = \delta_1 K_\delta \frac{F_{\delta_1} + F_{zs} + F_{js}}{F_{\delta_1}}; \quad (38.25')$$

λ_s , λ_1 и λ_2 — магнитные проводимости ветвей 1-3-4, 1-2-4 и 1-5-4 эквивалентной схемы (см. рис. 156).

Пренебрегая величиной м. д. с. на проведение потока через участки магнитопровода из стали, что в случае ненасыщенной машины вполне допустимо, можно считать:

λ_s — магнитная проводимость между магнитопроводами ротора;

$\lambda_1 = \frac{\sigma_1 l \tau}{2\delta_1 \cdot K_\delta}$ — проводимость двух зазоров δ_1 ;

$\lambda_2 = \frac{S_{\delta_2}}{2\delta_2}$ — проводимость дополнительных зазоров;

$\sigma_1 = \frac{\lambda_s}{\lambda_1}$ — коэффициент рассеяния обмотки возбуждения;

x_{fs_2} — индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения, обусловленное потоком Φ_s .

Более точно проводимости λ_1 и λ_2 могут быть определены из расчета магнитной цепи:

$$\lambda_1 = \frac{\Phi}{F_{\delta_1} + F_{zs} + F_{js}}; \quad \lambda_2 = \frac{\Phi_m}{F_{\delta_2} + F_r + F_{K.M} + F_{B.M}}. \quad (38.25'')$$

Величины x_{fd} и x_{fs} могут быть получены непосредственно из расчета магнитной цепи. Так как, согласно определению, x_{fd} представляет отношение э. д. с., индуцированной потоком взаимной индукции Φ в обмотке возбуждения, к току этой же обмотки

$$x_{fd} = \frac{E_1}{I_1},$$

то имеем

$$E_1 = \pi \sqrt{2} f \Phi \omega_1 \cdot 10^{-8}; \quad I_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{\gamma F}{\omega_1}.$$

Подставляя эти величины в формулу для x_{fd} , получим

$$x_{fd} = 2\pi f \frac{\Phi}{\Sigma F} w_1^2 \cdot 10^{-8}. \quad (38.26)$$

Аналогично можно определить x_{fs_2} :

$$x_{fs_2} = \frac{E_{\Phi s}}{I_1} = 2\pi f \cdot \frac{\Phi_s}{\Sigma F} \cdot 10^{-8} = x_{fd} \sigma_2. \quad (38.27)$$

Величины Φ , Φ_s и ΣF определяются из расчета магнитной цепи. Если магнитная цепь не насыщена, то, очевидно, величины отношений $\frac{\Phi}{\Sigma F}$ и $\frac{\Phi_s}{\Sigma F}$ являются постоянными.

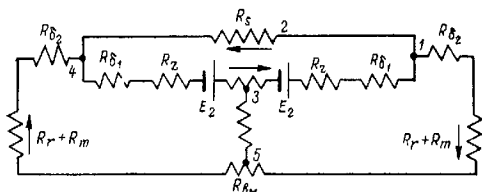


Рис. 161. Эквивалентная схема магнитной цепи бесконтактного селсина по продольной оси.

При подаче питания на обмотку синхронизации эквивалентная схема магнитной цепи бесконтактного селсина имеет вид, показанный на рис. 161. Из этого рисунка видно, что суммарный поток проходит через ветвь 1—3—4 и

$$\Phi = \Phi_m + \Phi_s.$$

Для расчета x_{ad} контактных явнополюсных селсинов пользуемся формулой (38.1), которая для бесконтактных селсинов, с учетом эквивалентной схемы (см. рис. 161), примет вид:

$$x_{ad} = 4,8 \cdot 10^{-8} f A_{d1} \frac{l\tau}{\delta_1''} \frac{1}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \frac{\lambda_s}{\lambda_2}} (w_2 k_{w_2})^2; \quad (38.28)$$

$$x_{s_2} = x_{ad} \sigma_2, \quad (38.29)$$

где $\sigma_2 = \frac{\lambda_s}{\lambda_2}$ — коэффициент рассеяния при питании обмотки синхронизации;

x_{s_2} — дополнительное индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки синхронизации, обусловленное потоком рассеяния между магнитопроводами ротора.

Величины x_{ad} и x_{s2} также могут быть найдены из расчета магнитной цепи по эквивалентной схеме (см. рис. 161).

Приведение параметров обмотки возбуждения к фазе обмотки синхронизации производится по формулам (38.6), причем, кроме r'_f и x'_{fs} , надо учитывать

$$x'_{fs2} = \frac{2}{3} \left(\frac{x_{ad}}{x_{af}} \right)^2 x_{fs2} = \frac{2}{3} \left(\frac{x_{ad}}{x_{af}} \right)^2 x_{fd\sigma_1} = \sigma_1 x_{ad} \frac{k_\Phi}{k_1}. \quad (38.30)$$

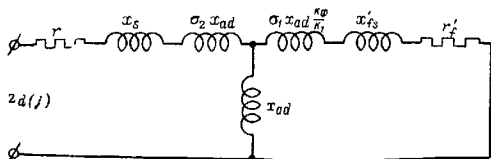


Рис. 162. Эквивалентная схема для расчета сопротивления бесконтактного селсина по продольной оси.

Эквивалентная схема (рис. 48) для бесконтактного селсина, с учетом рассеяния между магнитопроводами, примет вид, показанный на рис. 162. По этой схеме легко определить параметры селсина по продольной оси r'_d и x'_d :

$$\left. \begin{aligned} r'_d &= r + \frac{x_{ad}^2 r'_f}{r_f'^2 + \left[x_{ad} \left(1 + \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} \right) + x'_{fs} \right]^2} \\ x'_d &= x_s + \sigma_2 x_{ad} + \\ &+ \frac{x_{ad} \left\{ r_f'^2 + \left(x'_{fs} + x_{ad} \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} \right) \left[x_{ad} \left(1 + \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} \right) + x'_{fs} \right] \right\}}{r_f'^2 + \left[x_{ad} \left(1 + \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} \right) + x'_{fs} \right]^2} \end{aligned} \right\} \quad (38.31)$$

Е. Расчет параметров бесконтактных селсинов по поперечной оси

В контактных селсинах, имеющих поперечную шихтовку пакетов активной стали, поток Φ_{aq} , проходя вдоль пластин этих пакетов, на своем пути не встречает сколько-нибудь значительного сопротивления. В бесконтактных селсинах, имеющих ротор с продольной шихтовкой пакета сталн, поток Φ_{aq} , про-

ходя поперек пластин, на своем пути встречает значительное сопротивление. Наличие немагнитных прослоек между пластинами ротора не только уменьшает поперечный поток по величине, но и меняет его распределение вдоль дуги ротора, по сравнению с контактными селсинами. Кроме того, поперечный поток, пронизывая плоскость пластин ротора, индуцирует в них токи Фуко, которые еще больше демпфируют поперечный поток. Поперечный поток Φ_{aq} , встречая при своем прохождении поперек пластин ротора значительное сопротивление, частично проходит по другим параллельным путям.

Как было показано в главе VI, имеются две конструктивные формы роторов бесконтактных селсинов: роторы с торцевыми пакетами и без них. В первых торцевые пакеты, установленные в конце ротора, замыкают основные пластины ротора поперек. Поэтому в роторах с торцевыми пакетами поперечный поток проходит вдоль основных пластин и замыкается по торцевым пакетам. При этом поперечный поток Φ_{aq} на своем пути по ротору, как и в контактных селсинах, встречает небольшое сопротивление. В роторах второй конструкции поток Φ_{aq} частично замыкается поперек пластин ротора, а частично, проходя вдоль пластин ротора и через дополнительный воздушный зазор, замыкается через кольцевые магнитопроводы, как это показано на рис 163.

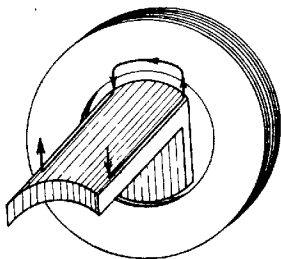


Рис. 163. Замыкание поперечного магнитного потока в бесконтактном селсине.

Для бесконтактных селсинов, имеющих роторы с торцевыми пакетами, поперечное индуктивное сопротивление можно так же, как и для явнополюсных контактных селсинов, находить по формуле (38.8). При расчете x_{aq} для бесконтактных селсинов, имеющих роторы без торцевых пакетов, нельзя пользоваться этой формулой. Точное определение величины x_{aq} аналитическим методом в этом случае затруднено из-за сложности прохождения поперечного потока, а также вследствие трудности количественного учета действия токов в пластинах ротора.

Вопрос о расчете x_{aq} для бесконтактных селсинов рассмотрен инженером Д. В. Свечарником в статье „Методика расчета бесконтактных селсинов ВЭИ“ [29]. Автор этой статьи, пренебрегая токами в пластинах роторов и делая ряд упрощающих допущений, определяет распределение поперечного потока

и дает следующую расчетную формулу для определения коэффициента A_{q1} , входящего в формулу (38.8):

$$A_{q1} = (1 - k_1) \left(\frac{b}{\tau} - \frac{1}{\pi} \right) + \frac{4d}{\pi} \cos \frac{\pi b}{2\tau},$$

где

$$k_1 = \frac{(1 - k_{ж}) l}{S_1 \delta_1 \left[\frac{1 - k_{ж}}{S_1} \left(\frac{l}{\delta_1} + \frac{l_1}{\delta_2} \right) + \frac{\pi^2}{\tau^2} \right]},$$

$k_{ж}$ — коэффициент заполнения для пакета стали ротора;

S_1 — площадь пластины ротора;

l, l_1 — длина пакета статора и кольцевых магнитопроводов;

d — отношение действительной индукции в междуполосном пространстве к той индукции, которая была бы в этом же месте при наличии равномерного зазора по всей окружности ротора.

К сожалению, эта формула в большинстве практических случаев из-за принятых допущений дает результаты, резко отличающиеся от опытных данных. Поэтому можно рекомендовать для расчета x_{aq} приближенную полуэмпирическую формулу

$$x'_{aq} = k x_{aq},$$

где k — коэффициент, учитывающий продольную шихтовку ротора;

x_{aq} — поперечное индуктивное сопротивление для ротора без поперечной шихтовки, определяемое по формуле (38.8).

Определим пределы коэффициента k . Если предполагать, что сопротивление поперек листов пакета ротора равно нулю, то получим максимальное значение k , равное единице $k_{\max} = 1$, а если считать, что сопротивление поперек листов пакета ротора бесконечно велико и весь поток Φ_{aq} замыкается через кольцевые магнитопроводы, то будем иметь минимальное значение k

$$k_{\min} = \frac{\delta_1 / F_{\delta_1}}{\delta_1 / F_{\delta_1} + \delta_2 / F_{\delta_2}}.$$

Для наиболее часто встречающегося случая $\delta_1 = \delta_2$ будем иметь

$$k_{\min} = \frac{F_{\delta_2}}{F_{\delta_1} + F_{\delta_2}},$$

но обычно $F_{\delta_1} = F_{\delta_2}$ и $k_{\min} = 0,5$.

Поэтому можно рекомендовать считать на практике

$$x'_{aq} \approx (0,7 \div 0,8) x_{aq}.$$

При этом $k = 0,8$ следует брать в случае низкой частоты и малых размеров пластин ротора, а $k = 0,7$ — при больших частотах и больших размерах пластин ротора. Эта формула в большинстве случаев дает результаты, отличающиеся от опытных данных не более чем на $\pm 10\%$.

Учитывая, что в бесконтактном селсине в поперечной оси нет демпферных обмоток, параметры по этой оси можно считать по формулам:

$$r'_q = r;$$

$$x'_q = x'_{aq} + x_s.$$

§ 39. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЯВНОПОЛЮСНОГО КОНТАКТНОГО СЕЛСИНА

А. Проектное задание

1. Напряжение обмотки возбуждения $U_1 = 110$ в.
 2. Линейное напряжение обмотки синхронизации $U_2 = 55$ в.
 3. Частота сети $f = 50$ гц.
 4. Удельный момент при работе от однопольного селсина $m_0 = 20$ гсм/град.
 5. Максимальный момент при работе от однопольного селсина $M_{\max} = 1200$ гсм.
 6. Время затухания колебаний ротора при согласовании не более $t_{\text{зат}} = 3$ сек.
 7. Потребляемая мощность не более $P_1 = 50$ ватт.
- Селсин предназначается для работы в качестве индикаторного приемника и датчика.

Б. Выбор основных размеров

1. Руководствуясь указаниями § 36 относительно выбора отношения l/D , для нашего случая берем $k = l/D = 1,14$. Определяем диаметр расточки статора согласно (36.12)

$$D_{is} = 1,7 \sqrt[4]{\frac{m_0}{k}} = 1,7 \sqrt[4]{\frac{20}{1,1}} = 3,47 \text{ см};$$

берем $D_{is} = 3,5$ см.

2. Определяем, согласно (36.15), наружный диаметр корпуса селсина в см:

$$D_k = 2D_{is} = 2 \cdot 3,5 = 7,0 \text{ см}.$$

3. Выбирая толщину корпуса $\Delta_1 = 2$ мм, находим наружный диаметр пластины статора в мм

$$D_{as} = D_k - 2\Delta_1 = 70 - 2 \cdot 2 = 66 \text{ мм}.$$

4. Определяем величину одностороннего воздушного зазора по формуле (37.9) в мм

$$\delta = \frac{D_{is}}{200} + 0,005 = \frac{35}{200} + 0,005 = 0,225 \text{ мм.}$$

5. Находим наружный диаметр ротора

$$D_{ar} = D_{is} - 2\delta = 35 - 2 \cdot 0,225 = 34,55 \text{ мм.}$$

6. Определяем длину пакета статора

$$l = kD_{is} = 1,14 \cdot 35 = 40 \text{ мм.}$$

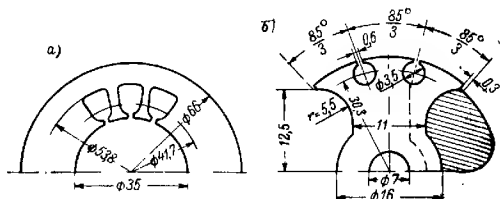


Рис. 164. Пластины контактного селсина: а — статора; б — ротора.

7. Выбирая коэффициент полюсной дуги $\alpha_i = 0,473$, число пазов статора $z_s = 15$ и, задаваясь отношением индукций отдельных участков к индукции воздушного зазора, находим геометрические размеры этих участков:

- а) полагая $\frac{B_{zs}}{B_\delta} = 2,7$, по (37.13) находим ширину зуба статора

$$b_z = \frac{t_1}{k_{\kappa}} \frac{B_\delta}{B_{zs}} = \frac{\pi D_{is}}{z_s k_{\kappa}} \frac{B_\delta}{B_{zs}} = \frac{\pi \cdot 35}{15 \cdot 0,95 \cdot 2,7} = 2,86 \text{ мм;}$$

- б) полагая $\frac{B_{js}}{B_\delta} = 2,25$, по (37.21) находим

$$h_{js} = \frac{D_{as} - D_{js}}{2} = \frac{\alpha_i \pi}{2 k_{\kappa}} \frac{B_\delta}{B_{js}} = \frac{\alpha_i \pi D_{is}}{4 k_{\kappa}} \frac{B_\delta}{B_{js}} = \frac{0,473 \cdot \pi \cdot 35}{4 \cdot 0,95 \cdot 2,25} = 6,08 \text{ мм;}$$

- в) полагая $\frac{B_m}{B_\delta} = 2,5$, где B_m индукция в полюсе ротора, легко определить

$$b_m = \frac{\alpha_i \pi}{k_{\kappa}} \frac{B_\delta}{B_m} = \frac{\alpha_i \pi D_{is}}{2 k_{\kappa}} \frac{B_\delta}{B_m} = \frac{0,473 \cdot \pi \cdot 35}{2 \cdot 0,95 \cdot 2,5} = 11 \text{ мм.}$$

8. По выбранным размерам составляем чертежи пластин статора (рис. 164, а) и ротора (рис. 164, б).

В. Расчет магнитной цепи

1. Наружный диаметр статора $D_{as} = 66$ мм.
2. Внутренний диаметр статора $D_{is} = 35$ мм.
3. Число зубцов статора $z_s = 15$.
4. Ширина зуба статора $b_z = 3,0$ мм.
5. Ширина прорези паза $b_s = 1,2$ мм.
6. Длина пакета статора $l = 40$ мм.
7. Теоретическая полюсная дуга $b_l = 85^\circ$.
8. Действительная полюсная дуга $b_n = 83^\circ$.
9. Число зубцовых делений на полюсе $z_r = 3$.
10. Ширина полюса $b_m = 11$ мм.
11. Диаметр яра ротора $D_{jr} = 16$ мм.
12. Внутренний диаметр ротора $D_{ir} = 7$ мм.
13. Наружный диаметр ротора $D_{ar} = 34,55$ мм.
14. Воздушный зазор $\delta = 0,225$ мм.
15. Полюсное деление

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2} = \frac{\pi \cdot 35}{2} = 55 \text{ мм.}$$

16. Определяем зубцевое деление статора:

$$t_s = \frac{\pi D_{is}}{z_s} = \frac{\pi \cdot 35}{15} = 7,33 \text{ мм.}$$

17. Определяем зубцевое деление ротора:

$$t_r = \frac{\pi D_{is}}{z_r} \cdot \frac{b_l}{360^\circ} = \frac{\pi \cdot 35 \cdot 85^\circ}{3 \cdot 360} = 8,65 \text{ мм.}$$

18. Индукция в зубцах статора [см. (37.13)]

$$B_z = \frac{t_s}{b_{zs} k_{ж}} B_\delta = \frac{7,33}{3 \cdot 0,95} B_\delta = 2,58 B_\delta.$$

19. Длина магнитной линии по зубцам статора [см. (37.11)]

$$l_{zs} = D_{js} - D_1 + 0,33d_1 = 5,38 - 4,17 + 0,33 \cdot 0,57 = 1,4 \text{ см.}$$

20. Индукция в яре статора [см. (37.21)]

$$B_{is} = \frac{\alpha_i \tau B_\delta}{(D_{as} - D_{js}) k_{ж}} = \frac{0,473 \cdot 5,5 B_\delta}{(6,6 - 5,38) 0,95} = 2,24 B_\delta.$$

21. Длина магнитной линии по яру статора

$$l_{js} = \frac{\pi}{4} (D_{as} + D_{is}) = \frac{\pi}{4} (6,6 + 5,38) = 9,4 \text{ см.}$$

22. Ширина зубцов ротора [по (37.15)]

$$b_{zr} = D_1 \sin \frac{\alpha}{2} - d = 30,3 \cdot \sin \frac{85^\circ}{6} - 3,5 = 3,9 \text{ мм.}$$

Крайние зубцы ротора имеют ширину $b_{zr} = 3,2$. Следовательно, средняя ширина будет равна

$$b'_{zr} = 0,33 (3,9 + 2 \cdot 3,2) = 3,43 \text{ мм.}$$

23. Индукция в зубцах ротора [по (37.13)]

$$B_{zr} = \frac{t_r}{k_{ж} b'_{zr}} B_\delta = \frac{8,65 B_\delta}{3,43 \cdot 0,95} = 2,65 B_\delta.$$

24. Длина магнитной линии по зубцам ротора [по (37.12')]

$$l_{zr} = 0,66 d_1 = 0,66 \cdot 0,35 = 0,23 \text{ см.}$$

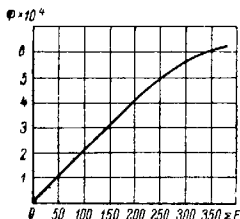


Рис. 165. Кривая намагничивания $\Phi = f(\Sigma F)$.

25. Длину магнитной линии по полюсам и яру ротора определяем графически

$$l_r = 2,85 \text{ см.}$$

26. Коэффициент полюсной дуги

$$\alpha_l = \frac{b_l}{180^\circ} = \frac{85^\circ}{180^\circ} = 0,473.$$

27. Полюсная дуга

$$b_l = \alpha_l \tau = 0,473 \cdot 5,5 = 2,6 \text{ см.}$$

28. Сечение воздушного зазора

$$S_\delta = b'_l l = 2,6 \cdot 4,0 = 10,4 \text{ см}^2.$$

29. Коэффициент Картера [по (37.2)]

$$\begin{aligned} K_\delta &= \frac{t_s + 10_\delta}{t_s - b_{s1} + 10_\delta} \cdot \frac{t_r + 10_\delta}{t_r - b_{s2} + 10_\delta} = \\ &= \frac{7,33 + 10 \cdot 0,225}{7,33 - 1,2 + 10 \cdot 0,225} \cdot \frac{8,65 + 10 \cdot 0,225}{8,65 - 0,6 + 10 \cdot 0,225} = 1,21. \end{aligned}$$

30. Магнитодвижущая сила воздушного зазора [по (34.4)]

$$F_\delta = 1,6 B_\delta \delta K_\delta = 1,6 \cdot 0,0225 \cdot 1,21 \cdot B_\delta = 0,0438 B_\delta.$$

31. Рассчитываем характеристику намагничивания $\Phi = f(\Sigma F)$ по методике, изложенной в § 37. Результаты расчета приведены в табл. 4.

По данным табл. 4 на рис. 165 построена кривая намагничивания $\Phi = f(\Sigma F)$.

B_δ	2000	3000	4000	5000	5500	6000
Φ	20 800	31 200	41 600	52 000	57 200	62 400
B_{zs}	5160	7730	10 300	12 900	14 200	15 500
B_{js}	4480	6720	8980	11 200	12 300	13 400
B_{zr}	5300	7950	10 600	13 300	14 600	15 900
B_m	5000	7500	10 000	12 500	13 750	15 000
$a\omega_{zs}$	1,3	2,18	3,88	7,9	12,3	22,5
$a\omega_{js}$	0,82	1,09	1,59	2,32	2,93	3,7
$a\omega_{zr}$	1,33	2,26	4,2	9,0	14,3	29,3
$a\omega_m$	1,26	2,09	3,62	7,03	10,7	17,3
F_{zs}	1,8	3,1	5,5	11,1	17,2	31,5
F_{js}	7,7	10,2	14,9	21,6	27,5	34,7
F_{zr}	0,3	0,5	1,0	2,1	3,3	6,8
F_m	3,6	6,0	10,3	20,1	30,6	49,5
F_δ	87,6	131,0	175,0	218,5	241,0	262,3
ΣF	101,0	150,8	206,7	273,4	319,6	384,8

Г. Расчет обмотки возбуждения

1. По характеристике намагничивания выбираем рабочий поток $\Phi = 58000$ макс.; $\Sigma F = 325$ ампервитков.

2. Задаемся э. д. с. обмотки возбуждения

$$E_1 = 104 \text{ в.}$$

3. Определяем число витков обмотки возбуждения

$$w = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4,44 f \Phi} = \frac{104 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 58 \cdot 10^3} = 810.$$

4. Определяем графически по рис. 164, б сечение катушки обмотки возбуждения:

полное сечение $S_k = 82 \text{ мм}^2$;

сечение изоляции $S_{из} = 10 \text{ мм}^2$;

сечение, занятое обмоткой,

$$S'_k = S_k - S_{из} = 82 - 10 = 72 \text{ мм}^2.$$

5. Сечение изолированного проводника обмотки возбуждения

$$q_0 = \frac{nS'_k k_3}{w_1} = \frac{2 \cdot 72 \cdot 0,57}{810} = 0,102 \text{ мм}^2,$$

где k_3 — коэффициент заполнения обмотки.

Выбираем провод марки ПЭВ-2:

диаметр его $d = 0,31 \text{ мм}$;

сечение провода без изоляции $q = 0,0755 \text{ мм}^2$;

сечение изолированного провода $q_0 = 0,102 \text{ мм}^2$.

6. Длина витка обмотки возбуждения

$$l_1 = 2(b_m + l) + \pi b_k = 2(11 + 40) + \pi \cdot 9 = 130 \text{ мм},$$

где b_k — ширина сечения катушки.

7. Сопротивление обмотки возбуждения при 20°C

$$R_1 = \frac{w_1 l_1}{57 \cdot q} = \frac{810 \cdot 0,13}{57 \cdot 0,0755} = 24,5 \text{ ом}.$$

8. Сопротивление этой обмотки в нагретом состоянии

$$R_{1t} = 1,24 \cdot 24,5 = 30 \text{ ом}.$$

9. Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения

$$\begin{aligned} x_1 &= 15,8 \cdot f w_1^2 \lambda \cdot l_1 \cdot 10^{-8} = \\ &= 15,8 \cdot 50 \cdot 810^2 \cdot 0,18 \cdot 13 \cdot 10^{-8} = 12,1 \text{ ом}, \end{aligned}$$

где $\lambda = 0,18$ — проводимость потоков рассеяния.

10. Вес зубцов статора

$$\begin{aligned} G_{zs} &= \left[\frac{\pi}{4} (D_{js}^2 - D_{is}^2) - z_s S_{ns} \right] l k_{ж} d_{ж} = \\ &= [0,785 (5,38^2 - 3,5^2) - 15 \cdot 0,547] 4 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 142 \text{ г}. \end{aligned}$$

11. Вес ярма статора

$$G_{js} = \frac{\pi}{4} (D_{as}^2 - D_{js}^2) l k_{ж} d_{ж} = \frac{\pi}{4} (6,6^2 - 5,83^2) 4 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 342 \text{ г}.$$

12. Вес зубцов ротора

$$\begin{aligned} G_{zr} &= \left\{ z_r \left[\frac{\pi}{4} D_{ar}^2 - \frac{\pi}{4} (D_1 - d_1)^2 \right] - n_r S_{nr} \right\} l k_{ж} d_{ж} = \\ &= \left\{ 0,473 \left[\frac{\pi}{4} \cdot 3,45^2 - \frac{\pi}{4} (3,03 - 0,35)^2 \right] - \right. \\ &\quad \left. - 4 \frac{\pi \cdot 0,35^2}{4} \right\} 4 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 40,5 \text{ г}, \end{aligned}$$

n_r — количество пазов на полюсах ротора; размеры D_1 и d_1 (см. рис. 164).

13. Вес полюсов и ярма ротора

$$G_m = b_m l_m l k_{ж} d_{ж} = 1,1 \cdot 2,85 \cdot 4 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 93 \text{ г}.$$

14. Рабочие индукции на отдельных участках магнитной цепи в гауссах определяем по табл. 4:

$$B_{zs} = 14\,500, \quad B_{js} = 12\,500, \quad B_{zr} = 14\,800, \quad B_m = 14\,000.$$

15. Потери в стали:

$$Q_{zs} = q_{zs} G_{zs} = 7,4 \cdot 0,142 = 1,05 \text{ вт};$$

$$Q_{js} = q_{js} G_{js} = 5,4 \cdot 0,342 = 1,85 \text{ вт};$$

$$Q_{zr} = q_{zr} G_{zr} = 7,7 \cdot 0,041 = 0,32 \text{ вт};$$

$$Q_m = q_m G_m = 6,9 \cdot 0,093 = 0,64 \text{ вт, где}$$

q удельные потери в стали, взятые из книги „Проектирование электрических машин“ под редакцией П. С. Сергеева, стр. 557.

Суммарные потери в стали

$$\begin{aligned} \Sigma Q_{\text{ст}} &= k_{\text{обп}} (Q_{zs} + Q_{js} + Q_{zr} + Q_m) = \\ &= 1,3 (1,05 + 1,85 + 0,32 + 0,64) = 5 \text{ вт.} \end{aligned}$$

16. Ток возбуждения селсина:

а) реактивная составляющая

$$I_p = \frac{\Sigma F}{\sqrt{2} \omega_1} = \frac{325}{\sqrt{2} \cdot 810} = 0,284 \text{ а};$$

б) активная составляющая

$$I_a = \frac{\Sigma Q_{\text{см}}}{E_1} = \frac{5}{104} = 0,048 \text{ а};$$

в) ток возбуждения

$$I_f = \sqrt{I_p^2 + I_a^2} = \sqrt{0,284^2 + 0,048^2} \approx 0,29 \text{ а}.$$

17. Проверка правильности принятой ранее величины э. д. с.:

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(E_1 + I_p x_1 + I_a R_{1t})^2 + (I_p R_{1t} - I_a x_1)^2} = \\ &= \sqrt{(104 + 0,284 \cdot 12,1 + 0,048 \cdot 30)^2 + (0,284 \cdot 30 - 0,048 \cdot 12,1)^2} = \\ &= 109,7 \text{ в.} \end{aligned}$$

Так как величина U_1 весьма близка к 110 в, пересчета E_1 не производим.

18. Джоулевые потери в обмотке возбуждения $Q_1 = I_f^2 R_{1t}$;

$$Q_1 = 0,29^2 \cdot 30 = 2,5 \text{ вт}.$$

19. Суммарные потери в селсине

$$\Sigma Q = \Sigma Q_{\text{ст}} + Q_1 = 5 + 2,5 = 7,5 \text{ вт}.$$

Эти потери для рассчитываемого нами селсина с диаметром ротора 35 мм и длиной ротора 40 мм являются вполне допустимыми.

Д. Расчет обмотки синхронизации

1. Фазная э. д. с.

$$E_{\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{55}{\sqrt{3}} = 31,7 \text{ в.}$$

2. Определяем первую гармонику магнитного потока согласно (37.7)

$$\Phi_1 = \frac{\Phi}{k_{\phi}} = \Phi \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin \frac{\alpha_1 \pi}{2}}{\alpha_1} = 58 \cdot 10^8 \frac{8}{\pi^2} \frac{\sin \frac{0,473\pi}{2}}{0,473} = 67,2 \cdot 10^8 \text{ мксв.}$$

3. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z_s}{2mp} = \frac{15}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 2,5.$$

4. Угол между соседними пазами

$$\alpha = \frac{360^\circ}{z} = \frac{360^\circ}{15} = 24^\circ.$$

5. Определяем обмоточный коэффициент с учетом скоса паза на одно зубцовое деление

$$k_{w_2} = \frac{3}{\pi} \sin(90^\circ \beta) = \frac{3}{\pi} \sin(90^\circ \cdot 0,8) = 0,91,$$

где $\beta = 0,8$ — коэффициент сокращения шага.

6. Определяем число витков одной фазы обмотки синхронизации

$$w_2 = \frac{E_{\phi} \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_1 k_{w_2}} = \frac{31,7 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 67,2 \cdot 10^8 \cdot 0,91} = 235.$$

7. Число витков в секции

$$w_s = \frac{w_2}{2q} = \frac{235}{2 \cdot 2,5} = 47.$$

8. Сечение паза статора (см. рис. 118 и 164)

$$\begin{aligned} S_{пз} &= \frac{b_n + d_1}{2} \cdot \frac{D_{ls} - D_1}{2} + \frac{\pi}{8} d_1^2 = \\ &= \frac{8,2 + 5,7}{2} \cdot \frac{53,8 - 41,7}{2} + \frac{\pi}{8} 5,7^2 = 54,7 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

9. Сечение изоляции паза и клина

$$\begin{aligned} S_{из} &= \Delta \left(b_n + D_{fs} - D_1 + \frac{\pi}{2} d_1 \right) = \\ &= 0,3 \left(8,2 + 53,8 - 41,7 + \frac{\pi}{2} 5,7 \right) = 8,8 \text{ мм}^2; \\ S_{\kappa} &= 2,5 \text{ мм}^2, \text{ где } \Delta - \text{толщина изоляции.} \end{aligned}$$

10. Полезное сечение паза статора

$$S'_{пз} = S_{пз} - S_{из} - S_{\kappa} = 54,7 - 8,8 - 2,5 = 43,4 \text{ мм}^2.$$

11. Сечение изолированного проводника обмотки синхронизации

$$q_0 = \frac{S'_{ns} k_3}{2w_s} = \frac{43,4 \cdot 0,52}{2 \cdot 47} = 0,238 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по стандарту проводник марки ПЭВ-2:

диаметр оголенного провода $d = 0,49 \text{ мм}$;

сечение этого провода $q = 0,189 \text{ мм}^2$;

сечение изолированного провода $q_0 = 0,238 \text{ мм}^2$.

12. Длина витка обмотки синхронизации может быть определена по формуле

$$l_2 = 2(l + l_s),$$

где $l_s = (1,2 + 1,3) \text{ ут}$,

y — шаг обмотки по пазам;

t — зубцевое деление по диаметру, проходящему по середине сечения паза.

Для нашего случая имеем:

$$l_s = 1,28 \cdot 6 \cdot 10,1 = 78 \text{ мм};$$

$$l_2 = 2(40 + 78) = 236 \text{ мм}.$$

13. Сопротивление фазы при 20°C

$$R_2 = \frac{w_2 l_2}{57 \cdot q} = \frac{235 \cdot 0,236}{57 \cdot 0,189} = 5,15 \text{ ом}.$$

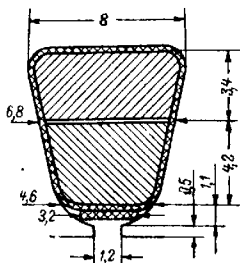


Рис. 166. Паз статора.

14. Сопротивление фазы в нагретом состоянии (так как секции предназначен для работы в индикаторном режиме и обмотка синхронизации работает фактически вхолостую, перегрев для нее считаем 30°)

$$R_{2t} = 1,12 R_2 = 1,12 \cdot 5,15 = 5,75 \text{ ом}.$$

15. Проводимость паза считаем по формуле

$$\lambda_n = \frac{1}{4} \left[\frac{2}{3} \frac{h_1}{b_{n2} + b_n} + k_3 \frac{h_3}{b_n + b_{n1}} + k_2 \left(\frac{2h_5}{b_{n1} + a_s} + \frac{h_6}{a_s} \right) \right],$$

где $k_2 = 3\beta + 1$; $k_3 = 3\beta + 1,67$ (см. «Проектирование электрических машин» под ред. Сергеева, стр. 149);

$$\lambda_n = \frac{1}{4} \left[\frac{2}{3} \frac{3,4}{8 + 6,8} + 4,07 \frac{4,2}{6,8 + 4,6} + 3,4 \left(\frac{2,11}{4,6 + 1,2} + \frac{0,5}{1,2} \right) \right] = 1,08.$$

Размеры отдельных участков паза даны на рис. 166.

16. Проводимость лобовых частей обмотки синхронизации

$$\lambda_s = 0,34 \frac{q}{l} (l_s - 0,64\beta\tau) = 0,34 \frac{2,5}{4} (7,8 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 5,5) = 1,06.$$

17. Реактивное сопротивление рассеяния фазы

$$x_s = 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \frac{l}{pq} (\lambda_n + \lambda_s) = \\ = 0,158 \cdot 0,5 \cdot 2,35^2 \frac{4}{1 \cdot 2,5} (1,08 + 1,06) = 1,6 \text{ ом.}$$

Е. Расчет параметров по продольной и поперечной осям

1. Находим эквивалентный воздушный зазор по продольной оси (см. § 38, раздел А)

$$\delta' = \delta \cdot K_\delta \frac{\sum F}{F_\delta} = 0,0225 \cdot 1,21 \frac{325}{244} = 0,0365 \text{ см.}$$

2. Определяем по формуле (38. 2) коэффициент A_{d1} :

$$A_{d1} = \alpha_l + \frac{\sin \alpha_l \pi}{\pi} = 0,473 + \frac{\sin (0,473 \pi)}{\pi} = 0,79.$$

3. Находим по формуле (38. 1) продольное реактивное сопротивление x_{ad} :

$$x_{ad} = 4,8 \cdot 10^{-8} f \frac{l \tau}{\delta'} A_{d1} (w_2 k_{w2})^2 = \\ = 4,8 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \frac{4 \cdot 5,5}{0,0365} 0,79 (235 \cdot 0,91)^2 = 52,6 \text{ ом.}$$

4. Определяем коэффициенты k_ϕ и k_1 по формулам (37. 7) и (38. 5'):

$$k_\phi = \frac{\pi^2}{8} \cdot \frac{\alpha_l}{\sin \frac{\alpha_l \pi}{2}} = \frac{\pi^2}{8} \frac{0,473}{\sin \frac{0,473 \pi}{2}} = 0,865; \\ k_1 = \frac{\sin \frac{\alpha_l \pi}{2}}{0,101 \pi (\alpha_l \pi + \sin \alpha_l \pi)} = \frac{\sin \frac{0,473 \pi}{2}}{0,101 \pi (0,473 \pi + \sin 0,473 \pi)} = 0,855.$$

5. Определяем по формуле (38. 6) параметры обмотки возбуждения, приведенные к фазе обмотки синхронизации

$$r'_f = \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_1} \right)^2 r_f = \frac{3}{2} \left(\frac{235 \cdot 0,91}{810 \cdot 0,855} \right)^2 \cdot 30 = 4,4 \text{ ом;} \\ x'_{fs} = \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 \cdot k_{w2}}{w_1 k_1} \right)^2 x_{fs} + \left(\frac{k_\phi}{k_1} - 1 \right) x_{ad} = \\ = \frac{3}{2} \left(\frac{235 \cdot 0,91^2}{810 \cdot 0,855} \right) 12,1 + \left(\frac{0,865}{0,855} - 1 \right) 52,6 = 2,37 \text{ ом.}$$

6. Находим параметры по продольной оси по формулам (38. 7):

$$r'_d = r + \frac{x_{ad}^2 \cdot r'_f}{r_f'^2 + (x_{ad} + x'_{fs})^2} = 5,75 + \frac{52,6^2 \cdot 4,4}{4,4^2 + (52,6 + 2,37)^2} = 9,75 \text{ ом};$$

$$\begin{aligned} x'_d &= x_s + \frac{x_{ad} [r_f'^2 + x'_{fs} (x_{ad} + x'_{fs})]}{r_f'^2 + (x_{ad} + x'_{fs})^2} = \\ &= 1,6 + \frac{52,6 [4,4^2 + 2,37 (52,6 + 2,37)]}{4,4^2 + (52,6 + 2,37)^2} = 4,2 \text{ ом}. \end{aligned}$$

7. Определяем эквивалентный зазор по поперечной оси

$$\delta'' = \delta \cdot K_\delta \frac{F_\delta + F_{zs} + F_{zr}}{F_\delta} = 0,0225 \cdot 1,21 \frac{244 + 19,4 + 3,8}{244} = 0,3 \text{ мм.}$$

8. Определяем по формуле (38. 9) коэффициент A_{q_1}

$$A_{q_1} = \alpha_f - \frac{\sin \alpha_f \pi}{\pi} = 0,473 - \frac{\sin 0,473 \pi}{\pi} = 0,156.$$

9. Находим x_{aq} по формуле (38.8)

$$\begin{aligned} x_{aq} &= 4,8 \cdot 10^{-8} f \frac{l_r}{\delta''} A_{q_1} (\omega_2 k_{\omega_2})^2 = 4,8 \cdot 10^{-8} \times \\ &\times 50 \frac{4 \cdot 5,5}{0,03} 0,156 (235 \cdot 0,91)^2 = 12,7 \text{ ом}. \end{aligned}$$

10. Диаметр стержня демпферной обмотки $d_c = 2,7 \text{ мм.}$

11. Сечение стержня

$$q_c = \pi \frac{d_c^2}{4} \approx \pi \frac{2,7^2}{4} = 5,75 \text{ мм}^2.$$

12. Сечение лобовых частей демпферной обмотки

$$q_c = h \cdot b = 1 \cdot 5 = 5 \text{ мм}^2.$$

13. Длина лобовых частей демпферной обмотки $l_s = 3,15 \text{ см}$ (определяется графически).

14. Сопротивление одного витка демпферной обмотки

$$R_k = \frac{2}{57} \left(\frac{l}{q_c} + \frac{l_s}{q_s} \right) = \frac{2}{57} \left(\frac{4}{5,75} + \frac{3,15}{5} \right) \cdot 10^{-2} = 4,65 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

Сечение одного витка этой же обмотки в нагретом состоянии при перегреве $\tau = 60^\circ \text{C.}$

$$R_{kt} = 1,24 \cdot R_k = 1,24 \cdot 4,65 \cdot 10^{-4} = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

15. Проводимость паза демпферной обмотки

$$\lambda_n = 0,66 + \frac{h}{b_s} = 0,66 + \frac{0,4}{0,6} = 1,32.$$

16. Проводимость лобовых частей $\lambda_s = 0,2$.

17. Реактивное сопротивление рассеяния витка демпферной обмотки

$$x_{\kappa s} = 15,8 \cdot f(\lambda_n l + \lambda_s l_s) \cdot 10^{-8} = 15,8 \cdot 50 (1,32 \cdot 4 + 0,2 \cdot 3,15) \times \\ \times 10^{-8} = 0,47 \cdot 10^{-4} \text{ ом.}$$

18. Определяем по формулам (38. 12) и (38. 3) коэффициенты k_2 и k_q

$$k_q = \frac{\pi^3}{24} \frac{\alpha_i}{\sin \frac{\alpha_i \pi}{3} \sin \frac{\alpha_i \pi}{6}} = \frac{\pi^3}{24} \frac{0,473}{\sin \frac{0,473 \pi}{3} \cdot \sin \frac{0,473 \pi}{6}} = 1,78;$$

$$k_2 = \frac{z_i}{1,212 A_{q1} k_q} = \frac{0,473}{1,212 \cdot 0,156 \cdot 1,78} = 1,4.$$

19. Определяем по формулам (38. 14) параметры демпферной обмотки, приведенные к фазе обмотки синхронизации:

$$r'_\kappa = \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 \cdot k_{w_2}}{w_\kappa \cdot k_2} \right)^2 \frac{r_\kappa}{2} = \frac{3}{2} \left(\frac{235 \cdot 0,91}{1 \cdot 1,4} \right)^2 \frac{5,8 \cdot 10^{-4}}{2} = 10,2 \text{ ом;}$$

$$x'_{\kappa s} = \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w_2}}{w_\kappa k_2} \right)^2 \frac{x_{\kappa s}}{2} + x_{aq} \left(\frac{k_q}{k_2} - 1 \right) = \\ = \frac{3}{2} \left(\frac{235 \cdot 0,91}{1 \cdot 1,4} \right)^2 \frac{0,47 \cdot 10^{-4}}{2} + 12,7 \left(\frac{1,78}{1,4} - 1 \right) = 4,13 \text{ ом.}$$

20. Находим по формулам (38. 15) r'_q и x'_q :

$$r'_q = r + \frac{x_{aq}^2 r'_\kappa}{r_\kappa'^2 + (x_{aq} + x'_{\kappa s})^2} = 5,75 + \frac{12,7^2 \cdot 10,2}{10,2^2 + (12,7 + 4,13)^2} = 10 \text{ ом;}$$

$$x'_q = x_s + \frac{x_{aq} [r_\kappa'^2 + x'_{\kappa s} (x_{aq} + x'_{\kappa s})]}{r_\kappa'^2 + (x_{aq} + x_{\kappa s})^2} = \\ = 1,6 + \frac{12,7 [10,2^2 + 4,13 (12,7 + 4,13)]}{10,2^2 + (12,7 + 4,13)^2} = 7,3 \text{ ом.}$$

Ж. Расчет рабочих характеристик селсина

1. Удельный синхронизирующий момент считаем по формуле (12. 4):

$$m_0 = \frac{21,2}{f} E_\Phi^2 \frac{x'_q}{r_q'^2 + x_q'^2} = \frac{21,2}{50} \cdot 31,7^2 \frac{7,3}{10^2 + 7,3^2} = 20,4 \frac{\text{гс.м}}{\text{град}}.$$

2. Производим расчет кривой синхронизирующего момента в зависимости от угла рассогласования по формуле (14. 5):

$$M = \frac{3}{4} \frac{1,02 \cdot 10^4}{2\pi \cdot f} E^2 \Phi \frac{x'_q \sin \theta}{\left(\frac{r'_d + r'_q}{2} - \frac{r'_d - r'_q}{2} \cos \theta \right)^2 + \left(\frac{x'_d + x'_q}{2} - \frac{x'_d - x'_q}{2} \cos \theta \right)^2} =$$

$$= 1,78 \cdot 10^6 \frac{\sin \theta}{(9,9 + 0,12 \cos \theta)^2 + (5,75 + 1,55 \cos \theta)^2} \text{ ЗСМ.}$$

Результаты расчета синхронизирующего момента приведены в табл. 5.

Таблица 5

θ°	10	30	45	60	90	120	150
$\sin \theta$	0,173	0,5	0,707	0,867	1,0	0,867	0,5
$\cos \theta$	0,985	0,867	0,707	0,5	0	-0,5	-0,867
$M_{\text{ЗСМ}}$	203	595	868	1080	1360	1280	770

По данным таблицы 5 на рис. 167 построена кривая $M = f(\theta)$.

3. Производим расчет максимального фазного тока по формуле (14. 9)

$$I_{\Phi \max} = \frac{E_{\Phi} \sin \theta / 2}{\left[\left(\frac{r'_d + r'_q}{2} - \frac{r'_d - r'_q}{2} \cos \theta \right)^2 + \left(\frac{x'_d + x'_q}{2} - \frac{x'_d - x'_q}{2} \cos \theta \right)^2 \right]^{1/2}} =$$

$$= \frac{31,7 \sin \frac{\theta}{2}}{[(9,9 + 0,12 \cos \theta)^2 + (5,75 + 1,55 \cos \theta)^2]^{1/2}}.$$

Результаты расчета максимального фазного тока приведены в табл. 6.

Таблица 6

θ	10	30	45	60	90	120	150	180
$\sin \frac{\theta}{2}$	0,0865	0,259	0,381	0,5	0,707	0,867	0,967	1,0
$I_{\Phi \max}$	0,22	0,67	1,01	1,33	1,97	2,5	2,84	2,96

По данным табл. 6 на рис. 167 построена кривая $I_{\Phi} = f(\theta)$.

4. Определяем сопротивление взаимной индукции x_{af} по формуле (38. 4):

$$x_{af} = 0,4 \pi^2 \cdot 10^{-8} f a_l \frac{l \tau w_1 w_2 k w_2}{k_\phi} = \\ = 0,4 \pi^2 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 0,473 \cdot \frac{4 \cdot 5,5}{0,0365} \frac{810 \cdot 235 \cdot 0,91}{0,865} = 113 \text{ ом.}$$

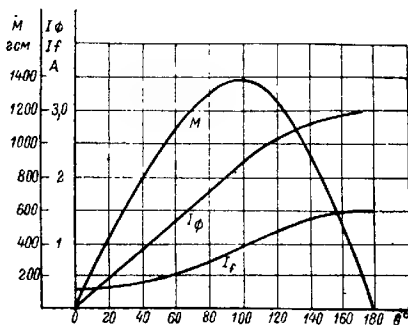


Рис. 167. Кривые зависимости синхронизирующего момента, тока возбуждения и фазного тока от угла рассогласования.

5. Определяем сопротивление самоиндукции обмотки возбуждения [24]:

$$x_{fd} = 0,4 \pi^2 \cdot 10^{-8} \cdot f a_l \frac{l \tau}{k} w_1^2 = 0,4 \pi^2 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 0,473 \times \\ \times \frac{4 \cdot 5,5}{0,0365} 810^2 = 370 \text{ ом.}$$

6. Определяем полное сопротивление обмотки возбуждения

$$z_f = r_1 + j(x_1 + x_{fd}) = 30 + j(12,1 + 370) = (30 + j 382) \text{ ом.}$$

7. Находим зависимость тока возбуждения от угла рассогласования по формуле (14. 7):

$$i_f = \frac{\dot{U}_1}{z_f} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{x_{af}^2}{z_f} \frac{\sin^2 \theta / 2}{r + j[x_c(j) - x_u(j) \cos \theta]} \right];$$

$$x_c(j) = \frac{x_d(j) + x_q(j)}{2}; \quad x_u(j) = \frac{x_d(j) - x_q(j)}{2};$$

$$jx_d(j) = r'_d + jx'_d - r = 9,75 + j4,2 - 5,75 = 4 + j4,2;$$

$$jx_q(j) = r'_q + jx'_q - r = 10 + j7,3 - 5,75 = 4,25 + j7,3;$$

$$jx_c(j) = 4,12 + j5,75; \quad jx_u(j) = -0,125 - j1,55.$$

Отсюда

$$I_f = \frac{110}{30 + j382} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{113^2}{30 + j382} \times \right. \\ \left. \times \frac{\sin^2 \theta/2}{[9,87 + 0,125 \cos \theta + j(5,75 + 1,55 \cos \theta)]} \right].$$

Результаты расчета тока возбуждения приведены в табл. 7.

Таблица 7

θ°	0	30	60	90	120	150	180
$\sin^2 \frac{\theta}{2}$	0	0,067	0,25	0,5	0,75	0,93	1,0
I_f	0,290	0,342	0,525	0,82	1,17	1,4	1,49

По данным табл. 7 на рис. 167 построена кривая $I_f = f(\theta)$.

8. При работе селсина в качестве датчика удельная мощность будет равна [см. формулу (13. 4)]

$$P_q = 0,457 \cdot \frac{E_\Phi^2}{z_q} = 0,457 \frac{31,7^2}{\sqrt{10^2 + 7,3^2}} = 37 \frac{\text{мва}}{\text{грао}^2}.$$

3. Расчет времени успокоения колебаний ротора

1. Определяем параметры r_0 и x_0 по уравнениям (23. 7):

$$r_0 = \frac{3}{2} \frac{x_{aq}^2 r'_k [(x_{aq} + x'_{ks})^2 - r_k'^2]}{[r_k'^2 + (x_{aq} + x'_{ks})^2]^2} =$$

$$= \frac{3}{2} \frac{12,7^2 \cdot 10,2 [(12,7 + 4,13)^2 - 10,2^2]}{[10,2^2 + (12,7 + 4,13)^2]^2} = 2,94 \text{ ом};$$

$$x_0 = 3 \frac{x_{aq}^2 r'_k (x_{aq} + x'_{ks})}{[r_k'^2 + (x_{aq} + x'_{ks})^2]^2} = 3 \frac{12,7^2 \cdot 10,2^2 (12,7 + 4,13)}{[10,2^2 + (12,7 + 4,13)^2]^2} = 5,6 \text{ ом}.$$

2. Находим коэффициент демпферного момента по формуле (23. 11):

$$T_D = \frac{3}{4} \frac{1,02 \cdot 10^4}{(2\pi f)^2} E_\Phi^2 \frac{(r + r_0) (r_q'^2 - x_q'^2) + 2r_q' x_q' x_0}{(r_q'^2 + x_q'^2)^2} =$$

$$= \frac{3}{4} \frac{1,02 \cdot 10^4}{(2\pi \cdot 60)^2} 31,7^2 \frac{(5,75 + 2,94) (10^2 - 7,3^2) + 2 \cdot 10 \cdot 7,3 \cdot 5,6}{(10^2 + 7,3^2)^2} = 4 \text{ гсмсек}.$$

3. Определяем момент инерции ротора. Ориентировочно можно считать, что ротор является круглым цилиндром с диаметром $D_{ar} = 3,54 \text{ см}$ и длиной $l' = l + 2\Delta l = 4 + 2 \cdot 0,5 = 5,0 \text{ см}$, где $2\Delta l$ — длина лобовых частей обмотки возбуждения. Учитывая коэффициент заполнения обмотки возбуждения $k_3 = 0,57$, принимаем средний удельный вес

$$d_{cp} = \frac{d_{ж} + 0,57 d_{\text{м}}}{2} = \frac{7,8 + 0,57 \cdot 8,9}{2} = 6,45 \text{ г/см}^3.$$

Находим

$$I = \frac{d_{cp}}{g} \frac{\pi r^4 l'}{2} = \frac{6,45}{981} \cdot \frac{\pi \cdot 1,77^4 \cdot 5}{2} = 0,5 \text{ гсмсек}^2.$$

4. Определяем коэффициент затухания колебаний (см. § 24):

$$\lambda = \frac{T_D}{2I} = \frac{4}{2 \cdot 0,5} = 4 \frac{1}{\text{сек}}.$$

5. Угловая частота колебаний ротора при согласовании

$$\nu = \sqrt{\frac{180}{\pi} \cdot \frac{m_0}{I} - \lambda^2} = \sqrt{\frac{180}{\pi} \cdot \frac{20,4}{0,5} - 4^2} = 48 \text{ 1/сек}.$$

Частота колебаний ротора

$$f_{\text{м}} = \frac{\nu}{2\pi} = \frac{48}{2\pi} = 7,6 \text{ гц}.$$

6. Декремент затухания колебаний ротора

$$\delta = e^{-\pi \frac{\lambda}{\nu}} = e^{-\pi \frac{4}{48}} = 0,77.$$

7. Зона нечувствительности $B = \frac{M_{\tau}}{m_0}$; если принять момент трения $M_{\tau} = 15 \text{ гсм}$, то

$$B = \frac{15}{20,4} = 0,73^\circ.$$

8. Время затухания колебаний ротора при согласовании по формуле (24. 4)

$$t_{\text{зат}} = \frac{\lg \left[1 + \frac{\theta_0}{2B} (1 - \delta) \right]}{0,434 \lambda}$$

Принимая первоначальный угол рассогласования $\theta_0 = 180^\circ$, получим

$$t_{\text{зат}} = \frac{\lg \left[1 + \frac{180}{2 \cdot 0,73} (1 - 0,77) \right]}{0,434 \cdot 4} = 0,85 \text{ сек}.$$

А. Проектное задание

1. Напряжение обмотки возбуждения $U_1 = 110$ в;
2. Линейное напряжение обмотки синхронизации $U_2 = 55,0$ в.
3. Частота сети $f = 50$ гц.
4. Удельный момент при работе от одиотипного датчика — $m_0 = 10 \frac{\text{гсм}}{\text{град}}$.
5. Максимальный синхронизирующий момент при работе от одиотипного датчика $M_{\max} = 600$ гсм.
6. Потребляемая мощность не более $P_1 = 50$ ватт.

Селсин предиазначается для работы в индикаторном режиме в качестве приемника и датчика.

Б. Выбор основных размеров

Руководствуясь указаниями, приведенными в § 36 относительно выбора отношения l/D , для данного случая берем $k = l/D = 1,0$. Определяем диаметр расточки статора согласно формуле (36.12):

$$D_{is} = 1,7 \sqrt[4]{\frac{m_0}{k}} = 1,7 \sqrt[4]{\frac{10}{1}} = 3,02 \text{ см};$$

приблизненно берем $D_{is} = 30$ мм. Определяем согласно формуле (36.14) наружный диаметр и длину корпуса селсина

$$D_k = 2,33 \cdot D_{is} = 2,33 \cdot 30 = 70 \text{ мм};$$

$$l_k = 3,8 \cdot l = 3,8 \cdot 30 = 114 \text{ мм}.$$

По формуле (37.9) определяем величину основного и дополнительного воздушных зазоров

$$\delta_1 = \delta_2 = \frac{D_{is}}{200} + 0,005 = \frac{30}{200} + 0,005 \approx 0,2 \text{ мм}.$$

Тогда наружный диаметр ротора будет равен

$$D_{ar} = D_{is} - 2\delta_1 = 30 - 2 \cdot 0,2 = 29,6 \text{ мм}.$$

Выбирая коэффициент полюсной дуги $\alpha_i = 0,5$, число пазов статора $z_s = 18$, и задаваясь отношением индукций отдельных участков к индукции в основном воздушном зазоре, находим геометрические размеры этих участков:

а) полагая $\frac{B_{z_s}}{B_{\delta_1}} = 2,8$, по формуле (37.13) находим ширину зубца статора

$$b_z = \frac{t_1}{k_{ж}} \cdot \frac{B_{\delta_1}}{B_{z_s}} = \frac{\pi D_{is}}{z_s k_{ж}} \frac{B_{\delta_1}}{B_{z_s}} = \frac{\pi \cdot 30}{18 \cdot 0,95 \cdot 2,8} = 1,97;$$

берем $b_z = 2$ мм

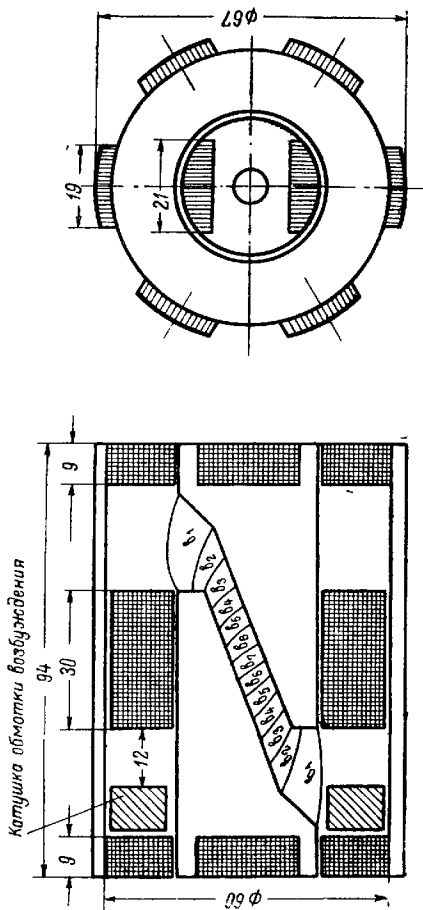


Рис. 168. Магнитная цепь бесконтактного селсина.

б) считая $\frac{B_{js}}{B_{\delta_1}} = 2,2$, по формуле (37.21) находим высоту ярма статора

$$h_{js} = \frac{D_{as} - D_{is}}{2} = \frac{\alpha_i \tau}{2k_{ж}} \frac{B_{\delta_1}}{B_{js}} = \frac{\alpha_i \pi D_{is}}{4k_{ж}} \cdot \frac{B_{\delta_1}}{B_{js}} = \frac{0,5\pi \cdot 30}{4 \cdot 0,95 \cdot 2,2} = 5,6 \text{ мм};$$

в) полагая $\frac{B_{в.м}}{B_{\delta_1}} = 2,2$ и $\sigma_1 = 0,1$, по формуле (37.35) найдем

$$n \cdot b \cdot h = \frac{\Phi_m}{k_{ж} B_{в.м}} = \frac{\alpha_i \tau l (1 + \sigma_1)}{k_{ж}} \frac{B_{\delta_1}}{B_{в.м}} = \frac{0,5\pi \cdot 3 \cdot 3 \cdot 1,1}{2 \cdot 0,95 \cdot 2,2} = 3,72 \text{ см}^2.$$

Обычно $nb = (0,5 + 0,6) \pi D_k$; поэтому высота стержня внешнего магнитопровода будет равна

$$h = \frac{3,72}{0,5 \cdot \pi \cdot 7} = 0,34 \text{ см};$$

г) полагая $B_{\delta_2} = B_{\delta_1}$ и учитывая, что ротор в нашем случае будет иметь торцевые пакеты, по формуле (37.30) получим

$$b_k + 2\delta_2 = \frac{\Phi_m}{0,9\pi D_{is} B_{\delta_2}} = \frac{\alpha_i \tau l (1 + \sigma_1)}{1,8} = \frac{0,5 \cdot 3 \cdot 1,1}{1,8} = 0,92 \text{ см},$$

откуда $b_k = 0,92 - 2 \cdot 0,02 = 0,88$; берем $b_k = 0,9 \text{ см}$.

На основе выбранных величин составляем эскиз магнитной цепи и чертеж пластин статора (см. рис. 168 и 169).

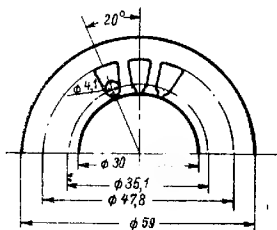


Рис. 169. Эскиз пластин статора.

В. Расчет магнитной цепи

1. Наружный диаметр статора $D_{as} = 59 \text{ мм}$.
2. Диаметр ярма статора $D_{js} = 47,8 \text{ мм}$.
3. Число зубцов статора $z_s = 18$.
4. Ширина прорези пазов статора $b_s = 1,0 \text{ мм}$.
5. Зубцовое деление статора

$$t_s = \frac{\pi D_{is}}{z_s} = \frac{\pi \cdot 30}{18} = 5,23 \text{ мм}.$$

6. Индукция в зубцах статора [по формуле (37.13)]

$$B_z = \frac{t_s}{b_z k_{ж}} B_{\delta} = \frac{5,23}{2 \cdot 0,95} \rightarrow 2,76 B_{\delta};$$

7. Расчетная длина магнитной линии по зубцам статора, согласно формуле (37.11):

$$l_z = (D_j - D_1) + 0,33 d_1 = (47,8 - 35,1) + 0,33 \cdot 4,1 = 14 \text{ мм} = 1,4 \text{ см.}$$

8. Длина магнитной линии по ярму статора, согласно формуле (37.18)

$$l_{js} = \frac{\pi}{4} (D_{as} + D_j) = \frac{\pi}{4} (5,9 + 4,78) = 8,4 \text{ см.}$$

9. Индукция в ярме статора [по формуле (37.21)]

$$B_{js} = \frac{\sigma_i \tau}{(D_{as} - D_{js}) k_{\kappa}} B_{i_1} = \frac{0,5 \cdot 4,71}{((5,9 - 4,78) 0,95)} B_{i_1} = 2,21 B_{i_1},$$

где

$$\tau = \frac{\pi D_{is}}{2} = \frac{\pi \cdot 3}{2} = 4,71 \text{ см.}$$

9. Коэффициент Картера [см. формулу (37.2)]

$$K_0 = \frac{t_1 + 10b_1}{t_1 + 10b_1 - b_s} = \frac{5,23 + 10 \cdot 0,2}{5,23 + 10 \cdot 0,2 - 1} = 1,16.$$

10. М. д. с. воздушного зазора [см. формулу (34.4)]

$$F_{i_1} = 1,6b_1 K_0 \cdot B_{i_1} = 1,6 \cdot 0,02 \cdot 1,16 B_{i_1} = 0,0371 B_{i_1}.$$

11. Магнитный поток

$$\Phi = \alpha_i l_z B_{i_1} = 0,5 \cdot 4,71 \cdot 3 B_{i_1} = 7,06 B_{i_1}.$$

12. Производим расчет магнитной цепи на участке; основной зазор, зубцы и ярмо статора $\Phi = f(F_{i_1} + F_z + F_j)$. Результаты расчета приведены в табл. 8 (пп. 1—10).

13. Определяем графически проводимость между двумя магнитопроводами. Картина магнитного поля показана на рис. 168

$$\lambda'_s = 0,4\pi b_r \sum_{i=1}^n \frac{b_i}{l_i} = 0,4\pi \cdot 2,96 \cdot \cos 45^\circ \times \\ \times \left[2 \cdot \frac{0,8}{1,8} + 2 \cdot \frac{0,45}{12} + 2 \cdot \frac{0,5}{0,8} + 2 \cdot \frac{0,45}{0,8} + 2 \cdot \frac{0,4}{0,8} + 2 \cdot \frac{0,4}{0,8} + \frac{0,4}{0,8} \right] \approx 17.$$

14. Находим поток рассеяния между магнитопроводами ротора

$$\Phi_s = \lambda_s (F_{i_1} + F_z + F_{js})$$

и определяем суммарный поток $\Phi_m = \Phi + \Phi_s$. Результаты расчета приведены в табл. 8 (строка 11—12).

15. Индукция в дополнительном воздушном зазоре

$$B_{\delta_2} = \frac{\Phi_m}{0,9\pi D_{\delta_2} b_k} = \frac{\Phi_m}{0,9\pi \cdot 3,0 \cdot 0,9} = 0,13 \Phi_m.$$

16. М. д. с. дополнительного воздушного зазора

$$F_{\delta_2} = 1,6 \delta_2 B_{\delta_2} = 1,6 \cdot 0,02 \cdot B_{\delta_2} = 0,032 \cdot B_{\delta_2}.$$

17. Среднее сечение магнитопровода ротора определяем по (37-27')

$$\begin{aligned} S_r &= k_{\text{ж}} \left[\frac{D_r^2}{8} (\alpha_i \pi - \sin \alpha_i \pi) + h_1 b_r \right] = \\ &= 0,95 \left[\frac{3,0^2}{8} (0,5\pi - \sin 0,5\pi) + 1,75 \cdot 2,1 \right] = 4,1 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

18. Индукция в магнитопроводе ротора

$$\begin{aligned} B_r &= \frac{\Phi_m}{S_r} = \frac{\Phi_m}{4,1} = \\ &= 0,294 \Phi_m. \end{aligned}$$

19. Длину магнитной линии по ротору определяем графически по рис. 168

$$l_r = 2 \cdot 6,2 = 12,4 \text{ см.}$$

20. Индукция в кольцевых магнитопроводах находится по формуле (37.33)

$$\begin{aligned} B_{\kappa.м} &= \frac{2\Phi_m}{\pi (D_{\kappa 1} + D_{\kappa 2}) b_{\kappa} k_{\text{ж}}} = \\ &= \frac{2\Phi_m}{\pi (3,0 + 6) \cdot 0,9 \cdot 0,95} = \\ &= 0,083 \cdot \Phi_m. \end{aligned}$$

21. Согласно формуле (37.32) длина магнитной линии по кольцевым магнитопроводам

$$l_{\kappa.м} = D_{\kappa 2} - D_{\kappa 1} = 6 - 3,0 = 3,0 \text{ см.}$$

22. Индукция во внешнем магнитопроводе по формуле (37.35)

$$B_{\text{в.м}} = \frac{\Phi_m}{\pi h b k_{\text{ж}}} = \frac{\Phi_m}{6 \cdot 0,34 \cdot 1,9 \cdot 0,95} = 0,271 \Phi_m.$$

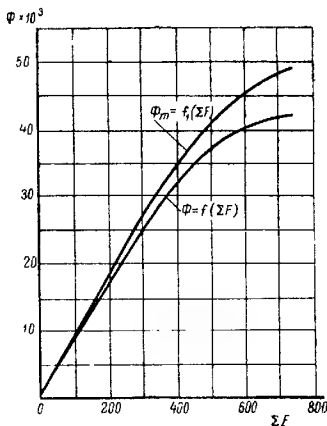


Рис. 170. Кривая намагничивания бесконтактного селсина.

Расчет кривой намагничивания

1	B_{δ_1}	2000	3000	4000	4500	5000	5500	6000
2	Φ	14 120	21 600	28 200	31 700	35 200	38 800	42 300
3	B_{zs}	5520	8280	11 100	12 400	13 800	15 200	16 600
4	B_{js}	4420	6630	8850	9900	11 100	12 200	13 300
5	aw_{zs}	1,4	2,5	4,7	6,8	10,7	19,2	46,9
6	aw_{js}	0,82	1,1	1,6	1,85	2,3	2,87	11,6
7	F_{δ_1}	74,2	111,2	148,5	167,0	185,5	204,0	222,5
8	F_{zs}	2,0	3,5	6,6	9,5	15,0	27,0	65,5
9	F_{js}	6,9	9,3	13,4	15,5	19,3	24,1	100,0
10	$F_{\delta_1} + F_{zs} + F_{js}$	83,1	124,0	168,5	192,0	219,8	255,1	387,0
11	Φ_s	1410	2110	2860	3260	3730	4330	6600
12	Φ_m	15 530	23 710	31 060	34 960	38 930	43 130	48 900
13	$\sigma = \frac{\Phi_s}{\Phi}$	0,1	0,098	0,101	0,103	0,106	0,111	0,156
14	B_z	3800	5800	7600	8500	9500	10 600	11 900
15	B_{δ_2}	2020	3080	4040	4550	5060	5600	6360
16	$B_{K \cdot M}$	1280	1970	2560	2900	3200	3600	4050
17	$B_{B \cdot M}$	4200	6500	8200	9500	10 500	11 700	13 300
18	aw_r	1,04	1,5	2,2	2,6	3,3	4,2	5,9
19	$aw_{K \cdot M}$	0,69	0,79	0,87	0,91	0,94	1,01	1,08
20	$aw_{B \cdot M}$	1,1	1,7	2,43	3,25	4,08	5,57	9,0
21	F_{δ_2}	64,5	98,5	129,0	145,0	162,0	179,0	204,0
22	F_r	13,0	19	27	33	41	52	73,0
23	$F_{K \cdot M}$	2,1	2,4	2,6	2,7	2,8	3,0	3,2
24	$F_{B \cdot T}$	10,3	16,0	23,0	30,6	38,5	52,5	84,5
25	ΣF	173,0	260,0	350,0	404,0	464,0	542,0	752

23. Длину магнитной линии по внешнему магнитопроводу определяем по рис. 168

$$l_{в.м} = 9,4 \text{ см.}$$

24. Производим расчет магнитной цепи $\Phi = f(\Sigma F)$. Результаты расчета приведены в табл. 8.

По данным этой таблицы на рис. 170 построены кривые намагничивания селсина $\Phi = f(\Sigma F)$ и $\Phi_m = f_1(\Sigma F)$.

Г. Расчет обмотки возбуждения

1. На основе характеристики $\Phi = f(\Sigma F)$ выбираем рабочий поток

$$\Phi = 37\,000 \text{ мксв;}$$
$$\Phi_m = 41\,500 \text{ мксв; } \Sigma F = 500 \text{ ампервитков.}$$

2. Задаемся э. д. с. обмотки возбуждения $E_1 = 101 \text{ в.}$

3. Определяем число витков обмотки возбуждения

$$w_1 = \frac{E_1 \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \Phi_m} = \frac{101 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 41\,500} = 1095,$$

берем $w_1 = 1100$.

По рис. 168 определяем размеры катушек обмотки возбуждения. Учитывая, что промежуток между кольцевыми магнитопроводами и статором равен 23 мм, берем длину катушки возбуждения 11 мм, оставляя 12 мм для лобовых частей обмотки синхронизации. Размеры катушки возбуждения: наружный диаметр $D_{к1} = 58 \text{ мм}$, внутренний диаметр $D_{к2} = 32 \text{ мм}$, длина катушки $l_k = 11 \text{ мм}$.

По этим данным определяем сечение катушки

$$S_k = \frac{1}{2} (D_{к1} - D_{к2}) l_k = \frac{1}{2} (58 - 32) 11 = 145 \text{ мм}^2.$$

4. Находим сечение изолированного проводника

$$q_0 = \frac{2 S_k k_3}{w_1} = \frac{2 \cdot 145 \cdot 0,51}{1100} = 0,133 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по стандарту провод марки ПЭВ-2:

диаметр оголенного провода $d = 0,35 \text{ мм}$;

сечение этого провода $q = 0,0962 \text{ мм}^2$;

сечение изолированного провода $q_0 = 0,132 \text{ мм}^2$.

5. Определяем длину витка обмотки возбуждения

$$l_1 = \pi \frac{D_{к2} + D_{к1}}{2} = \pi \frac{58 + 32}{2} = 141 \text{ мм.}$$

6. Сопротивление обмотки возбуждения:

а) при температуре окружающей среды 20°C

$$R_1 = \frac{w_1 l_1}{57 q} = \frac{1100 \cdot 0,141}{57 \cdot 0,0962} = 22 \text{ ом.}$$

б) в нагретом состоянии при перегреве $\tau^\circ = 60^\circ \text{C}$

$$R_{1t} = 1,24R_1 = 1,24 \cdot 22 = 27,2 \text{ ом.}$$

7. Определяем проводимость [потоков рассеяния для катушки возбуждения.

Рассматривая пространство между наружной поверхностью ротора, стержнями внешнего магнитопровода и кольцевыми магнитопроводами как некоторый паз, на дне которого помещается обмотка возбуждения, можно написать:

$$\lambda_1 = \left(\frac{2h_1}{D_1 - D_{ar}} + \frac{2h_2}{3(D_1 - D_{ar})} \right) \frac{nb}{\pi D_1},$$

где

D_1 — наружный диаметр кольцевого магнитопровода;
 h_2 — высота катушки возбуждения (в осевом направлении);
 h_1 — промежуток между катушкой возбуждения и пакетом статора;

b — ширина стержней внешнего магнитопровода.

Подставляя в эту формулу соответствующие величины, получаем:

$$\lambda_1 = \left[\frac{2 \cdot 12}{60 - 29,6} + \frac{2 \cdot 11}{3(60 - 29,6)} \right] \frac{6 \cdot 19}{\pi \cdot 60} = 0,63.$$

8. Находим индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения:

$$x_1 = 4\pi f l_1 \lambda_1 \left(\frac{w_1}{2} \right)^2 \cdot 10^{-8} = 4\pi \cdot 50 \cdot 14,1 \cdot 0,63 \cdot 550^2 \cdot 10^{-8} = 17,1 \text{ ом.}$$

9. Для определения потерь в стали находим вес отдельных участков магнитной цепи:

а) вес зубцов статора

$$G_{zs} = \left[\frac{\pi}{4} (D_{js}^2 - D_{ls}^2) - z_s S_{\pi} \right] l \cdot k_{ж} \cdot d_{ж} = \\ = \left[\frac{\pi}{4} (4,78^2 - 3^2) - 18 \cdot 0,4 \right] 3 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 84 \text{ г;}$$

б) вес ярама статора

$$G_{js} = \frac{\pi}{4} (D_{as}^2 - D_{js}^2) l \cdot k_{ж} \cdot d_{ж} = \frac{\pi}{4} (5,9^2 - 4,78^2) 3 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 210 \text{ г;}$$

в) вес ротора (расчетный, учитывает только основные магнитопроводы)

$$G_r = L_r \cdot S_r \cdot k_{ж} \cdot d_{ж} = 12,4 \cdot 4,1 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 377 \text{ г;}$$

г) вес кольцевых магнитопроводов

$$G_{к.м} = \frac{\pi}{2} (D_{к2}^2 - D_{к1}^2) b_{к} k_{ж} d_{ж} = \frac{\pi}{2} (6^2 - 3^2) 0,9 \cdot 0,95 \cdot 7,8 = 284 \text{ г;}$$

д) вес стержней внешнего магнитопровода

$$G_{в.м} = n h b k_{жв.м} d_{ж} = 6 \cdot 0,34 \cdot 1,9 \cdot 0,95 \cdot 9,4 \cdot 7,8 = 270 \text{ з.}$$

10. Рабочие индукции в отдельных участках магнитной цепи:

$$\begin{aligned} B_{zs} &= 14500 \text{ зс}; & B_{к.м} &= 3450 \text{ зс}; \\ B_{js} &= 11700 \text{ зс}; & B_{в.м} &= 11000 \text{ зс}. \\ B_r &= 10000 \text{ зс}; \end{aligned}$$

11. Находим потери в стали:

$$\begin{aligned} Q_{zs} &= q_{zs} G_{zs} = 7,4 \cdot 0,084 = 0,62 \text{ вт}; \\ Q_{js} &= q_{js} G_{js} = 4,6 \cdot 0,21 = 0,96 \text{ вт}; \\ Q_r &= q_r G_r = 3,3 \cdot 0,377 = 1,25 \text{ вт}; \\ Q_{к.м} &= q_{к.м} G_{к.м} = 0,54 \cdot 0,284 = 0,15 \text{ вт}; \\ Q_{в.м} &= q_{в.м} G_{в.м} = 4,02 \cdot 0,27 = 1,09 \text{ вт}. \end{aligned}$$

Удельные потери (см. § 39, п. Г-15):

$$\begin{aligned} \Sigma Q_{ст} &= k (Q_{zs} + Q_{js} + Q_r + Q_{к.м} + Q_{в.м}) = \\ &= 1,5 (0,62 + 0,96 + 1,25 + 0,15 + 1,09) = 6,1 \text{ вт} \end{aligned}$$

(коэффициент k учитывает увеличение потерь в стали от механической обработки).

12. Дополнительные потери в магнитной цепи от образования короткозамкнутых контуров

$$Q_x = 4 \text{ вт.}$$

13. Определяем ток возбуждения:

а) реактивная составляющая

$$I_p = \frac{\Sigma F}{\sqrt{2} \omega_1} = \frac{500}{\sqrt{2} 1100} = 0,32 \text{ а};$$

б) активная составляющая

$$I_a = \frac{\Sigma Q_{ст} + Q_x}{E_1} = \frac{6,1 + 4}{101} = 0,1 \text{ а};$$

в) ток возбуждения

$$I_p = \sqrt{I_p^2 + I_a^2} = \sqrt{0,32^2 + 0,1^2} = 0,335 \text{ а.}$$

14. Проверяем правильность величины E_1 :

$$\begin{aligned} U_1 &= \sqrt{(E_1 + I_p x_1 + I_a R_{1t})^2 + (I_a x_1 - I_p R_{1t})^2} = \\ &= \sqrt{(101 + 0,32 \cdot 17,1 + 0,1 \cdot 27,2)^2 + (0,32 \cdot 27,2 - 0,1 \cdot 17,1)^2} = \\ &= 109,8 \text{ в,} \end{aligned}$$

так как величина напряжения весьма близка к заданной величине 110 в, перерасчета E_1 не производим.

15. Джоулевы потери в обмотке возбуждения

$$Q_1 = I_f^2 R_{1f} = 0,335^2 \cdot 27,2 = 3,0 \text{ вт.}$$

16. Определяем суммарные потери в селсине

$$\sum Q = \sum Q_{\text{ст}} + Q_{\text{л}} + Q_1 = 6,1 + 4,0 + 3,0 = 13,1 \text{ вт.}$$

Эти потери следует считать вполне допустимыми для рассчитываемого нами селсина.

Д. Расчет обмотки синхронизации

1. Число фаз обмотки синхронизации $m = 3$.

2. Фазная э. д. с.

$$E_{\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}} = \frac{55}{\sqrt{3}} = 31,7 \text{ в.}$$

3. Первая гармоника магнитного потока

$$\Phi_1 = \frac{\Phi}{k_{\phi}}; \quad k_{\phi} = \frac{\pi^2}{8} \frac{\alpha_l}{\sin \frac{\alpha_l \pi}{2}} = \frac{\pi^2}{8} \frac{0,5}{\sin \frac{0,5\pi}{2}} = 0,873;$$

$$\Phi_1 = \frac{37\,000}{0,873} = 42\,400 \text{ мксв.}$$

4. Число пазов на полюс и фазу

$$q = \frac{z}{2mp} = \frac{18}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 3.$$

5. Обмоточный коэффициент с учетом скоса паза

$$k_{w_2} = \frac{3}{\pi} \sin \beta \cdot 90^\circ,$$

где β — коэффициент сокращения шага обмотки;

$$k_{w_2} = \frac{3}{\pi} \sin \frac{7}{9} \cdot 90^\circ \approx 0,9.$$

6. Определяем число витков в фазе обмотки синхронизации

$$w_2 = \frac{E_{\phi} \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_1 \cdot k_{w_2}} = \frac{31,7 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 42\,400 \cdot 0,9} = 375;$$

принимаем $w_2 = 378$.

7. Находим число витков в секции

$$w_s = \frac{w_2}{2q} = \frac{378}{2 \cdot 3} = 63.$$

8. Полное сечение паза статора

$$S_n = \frac{b_n + d_1}{2} \cdot \frac{D_{js} - D_1}{2} + \frac{\pi}{8} d_1^2 = \frac{6,3 + 4,1}{2} \cdot \frac{47,8 - 35,1}{2} + \\ + \frac{\pi}{8} \cdot 4,1^2 = 40 \text{ мм}^2.$$

9. Сечение изоляции паза и клина

$$S_{из} = \Delta_{из} \left[b_n + (D_{fs} - D_1) + \frac{\pi}{2} d_1 \right] =$$

$$= 0,25 \left[6,3 + (47,8 - 35,1) + \frac{\pi}{2} \cdot 4,1 \right] = 6,3 \text{ мм}^2;$$

$$S_{кл} = 2 \text{ мм}^2.$$

10. Полезное сечение паза статора

$$S'_n = S_n - S_{из} - S_{кл} = 40 - 6,3 - 2 = 31,7 \text{ мм}^2.$$

11. Сечение изолированного проводника

$$q_0 = \frac{S'_n k_3}{2w_s} = \frac{31,7 \cdot 0,525}{2 \cdot 63} = 0,132 \text{ мм}^2.$$

Выбираем по стандарту провод марки ПЭВ-2:

диаметр $d = 0,35 \text{ мм}$;

сечение оголенного провода $q = 0,0962 \text{ мм}^2$;

сечение изолированного провода $q_0 = 0,132 \text{ мм}^2$.

12. Длина витка обмотки синхронизации

$$l_2 = 2(l + 1,28y_z t_c) = 2(30 + 1,28 \cdot 7 \cdot 7) = 186 \text{ мм},$$

где y_z — шаг обмотки по пазам;

t_c — зубцовое деление по середине сечения пазов статора.

13. Сопротивление фазы обмотки синхронизации:

а) при температуре окружающей среды 20°C

$$R_2 = \frac{w_2 l_2}{57q} = \frac{378 \cdot 0,186}{57 \cdot 0,0962} = 12,8 \text{ ом};$$

б) сопротивление фазы обмотки синхронизации в нагретом состоянии (перегрев 30°C)

$$R_{2t} = 1,12 \cdot 12,8 = 14,4 \text{ ом}.$$

14. Проводимость паза статора

$$\lambda_n = \frac{1}{4} \left[\frac{2}{3} \frac{h_1}{b_{n2} + b_n} + k_3 \frac{h_3}{b_n + b_{n1}} + k_2 \left(\frac{2h_5}{b_{n1} + a_s} + \frac{h_6}{a_s} \right) \right],$$

см. § 39, п. Д — 15;

$$k_2 = 3\beta + 1 = 3 \cdot \frac{7}{9} + 1 = 3,33; \quad k_3 = 3\beta + 1,67 = 3 \cdot \frac{7}{9} + 1,67 = 4,0;$$

$$\lambda_n = \frac{1}{4} \left[\frac{2}{3} \frac{3,4}{6 + 5} + 4 \frac{3,6}{5 + 3,6} + 3,33 \left(\frac{2,1}{3,6 + 1} + \frac{0,5}{1,0} \right) \right] = 1,25.$$

(Размеры паза см. на рис. 171).

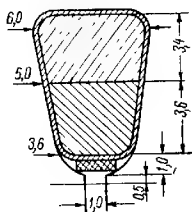


Рис. 171. Паз статора бесконтактного селсина.

15. Проводимость лобовых частей

$$\lambda_s = 0,34 \frac{q}{l} (l_s - 0,64\tau\beta) = 0,34 \frac{3}{3} (6,3 - 0,64 \cdot 4,71 \cdot 0,78) = 1,34.$$

16. Реактивное сопротивление рассеяния фазы обмотки синхронизации

$$\begin{aligned} x_s &= 0,158 \frac{f}{100} \left(\frac{w_2}{100} \right)^2 \frac{l}{pq} (\lambda_n + \lambda_s) = \\ &= 0,158 \cdot 0,5 \cdot 3,78^2 \cdot \frac{3}{1,3} (1,25 + 1,34) = 2,9 \text{ ом}. \end{aligned}$$

Е. Расчет параметров по поперечной и продольной осям

1. Так как рассчитываемый нами селсин имеет на роторе торцевые пакеты, то, как было указано выше, расчет x_{aq} можно производить по формулам (38. 8), (38. 9):

$$\begin{aligned} A_{q1} &= \alpha_i - \frac{\sin \alpha_i \pi}{\pi} = 0,5 - \frac{\sin 0,5\pi}{\pi} = 0,182; \\ x_{aq} &= 4,8 \cdot 10^{-8} f \frac{l\tau}{\delta''} A_{q1} (w_2 k_{w2})^2; \\ \delta'' &= \delta_1 K_s \frac{F_{\delta_1} + F_z + F_r}{F_{\delta_1}} = 0,02 \cdot 1,16 \frac{195 + 21 + 46}{195} = 0,0312; \\ x_{aq} &= 4,8 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \frac{3 \cdot 4,71}{0,0312} \cdot 0,182 (378 \cdot 0,9)^2 = 22,8 \text{ ом}. \end{aligned}$$

При расчете δ'' учитываем м. д. с. ротора F_r , так как поперечный поток замыкается через торцевые пакеты, проходя вдоль пакета ротора.

2. Поперечное реактивное и активное сопротивления фазы обмотки синхронизации

$$x'_q = x_{aq} + x_s = 22,8 + 2,9 = 25,7 \text{ ом}; \quad r'_q = R_{zf} = 14,4 \text{ ом}.$$

3. Находим сопротивление x_{fd} по формуле (38. 25)

$$x_{fd} = 0,4\pi^2 \cdot 10^{-8} f \alpha_i \frac{l\tau}{\delta_1''} \frac{w_1^2}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \frac{\lambda_s}{\lambda_2}},$$

где δ'' определяется по формуле (38.25'), а λ_1 и λ_2 по формулам (38. 25''):

$$\begin{aligned} \delta_1'' &= 0,02 \cdot 1,16 \frac{195 + 21 + 22}{195} = 0,0283; \\ \lambda_1 &= \frac{\Phi}{F_{\delta_1} + F_{zs} + F_{js}} = \frac{37\,000}{195 + 21 + 22} = 156; \\ \lambda_2 &= \frac{\Phi_m}{F_{\delta_2} + F_2 + F_{\kappa, м} + F_{в, м}} = \frac{41\,500}{171 + 46 + 2,9 + 45,5} = 157. \end{aligned}$$

Подставляя соответствующие величины в формулу для x_{fd} , получим

$$x_{fd} = 0,4\pi^2 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 0,5 \frac{3 \cdot 4,71}{0,0283} \cdot \frac{1100^2}{1 + \frac{156}{157} + \frac{17}{157}} = 284 \text{ ом.}$$

Сопротивление x_{fd} можно определить также по формуле (38. 26).

4. Находим сопротивление x_{fs2} по формуле (38. 25)

$$x_{fs2} = \sigma_1 x_{fd} = \frac{\lambda_s}{\lambda_1} x_{fd} = \frac{17}{156} \cdot 284 = 31 \text{ ом.}$$

5. Определяем коэффициент A_{d1} по формуле (38. 2)

$$A_{d1} = \alpha_t + \frac{\sin \alpha_t \pi}{\pi_d} = 0,5 + \frac{\sin 0,5\pi}{\pi} = 0,818.$$

6. Находим продольное сопротивление фазы обмотки синхронизации по формуле (38. 28)

$$\begin{aligned} x_{ad} &= 4,8 \cdot 10^{-8} \cdot f \cdot A_{d1} \frac{l\tau}{8^v} \frac{(w_2 k_{w2})^2}{1 + \frac{\lambda_1}{\lambda_2} + \frac{\lambda_s}{\lambda_2}} = \\ &= 4,8 \cdot 10^{-8} \cdot 50 \cdot 0,818 \frac{3 \cdot 4,71 (378 \cdot 0,9)^2}{0,0283 \left(1 + \frac{156}{157} + \frac{17}{157}\right)} = 54,3 \text{ ом.} \end{aligned}$$

7. Находим дополнительное реактивное сопротивление рассеяния, обусловленное потоками рассеяния между магнитопроводами ротора, по формуле (38. 29)

$$x_{s2} = \sigma_2 x_{ad} = \frac{\lambda_s}{\lambda_2} x_{ad} = \frac{17}{157} \cdot 54,3 = 5,9 \text{ ом.}$$

8. Приводим параметры обмотки возбуждения к фазе обмотки синхронизации согласно формуле (38. 6), для чего предварительно находим k_1 по формуле (38. 5'):

$$k_1 = \frac{\sin \frac{\alpha_t \pi}{2}}{0,101\pi(\alpha_t \pi + \sin \alpha_t \pi)} = \frac{\sin \frac{0,5\pi}{2}}{0,101(0,5\pi + \sin 0,5\pi)\pi} = 0,868;$$

$$r_f' = \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_1} \right)^2 r_f - \frac{3}{2} \left(\frac{378 \cdot 0,9}{1100 \cdot 0,868} \right)^2 27,2 = 5,2 \text{ ом;}$$

$$\begin{aligned} x_{fs}' &= \frac{3}{2} \left(\frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_1} \right)^2 x_{fs} + x_{ad} \left(\frac{k_\Phi}{k_1} - 1 \right) = \\ &= \frac{3}{2} \left(\frac{378 \cdot 0,9}{1100 \cdot 0,868} \right)^2 17,1 + 54,3 \left(\frac{0,873}{0,868} - 1 \right) = 3,3 \text{ ом.} \end{aligned}$$

9. Находим параметры по продольной оси r'_d и x'_d по формулам (38.40):

$$\begin{aligned}
 r'_d &= r + \frac{x_{ad}^2 r'_f}{r_f'^2 + \left[x_{ad} \left(1 + \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} \right) + x'_{fs} \right]^2} = \\
 &= 14,4 + \frac{54,3^2 \cdot 5,2}{5,2^2 + \left[54,3 \left(1 + 0,109 \frac{0,873}{0,868} \right) + 3,3 \right]^2} = 18,2 \text{ ом}; \\
 x'_d &= x_s + \sigma_2 x_{ad} + \\
 &+ \frac{x_{ad} \left\{ r_f'^2 + \left(x'_{fs} + \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} x_{ad} \right) \cdot \left[x_{ad} \left(1 + \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} \right) + x'_{fs} \right] \right\}}{r_f'^2 + \left[x_{ad} \left(1 + \sigma_1 \frac{k_\Phi}{k_1} \right) + x'_{fs} \right]^2} = \\
 &= 2,9 + 5,9 + \\
 &= \frac{54,3 \left\{ 5,2^2 + \left(3,3 + 0,109 \frac{0,873}{0,868} 54,3 \right) \left[54,3 \left(1 + 0,109 \frac{0,873}{0,868} \right) + 3,3 \right] \right\}}{5,2^2 + \left[54,3 \left(1 + 0,109 \frac{0,873}{0,868} \right) + 3,3 \right]^2} = \\
 &= 17 \text{ ом}.
 \end{aligned}$$

Ж. Расчет рабочих характеристик селсина

1. Находим удельный синхронизирующий момент по формуле (12.4)

$$m_0 = \frac{21,2}{f} E_\Phi^2 \frac{x'_q}{r_q'^2 + x_q'^2} = \frac{21,2}{50} 31,7^2 \frac{25,7}{14,4^2 + 25,7^2} = 12,5 \frac{\text{гсм}}{\text{град}}.$$

По заданию мы должны были иметь только $10 \frac{\text{гсм}}{\text{град}}$, т. е. по удельному моменту имеем некоторый запас.

2. Производим расчет кривой синхронизирующего момента в зависимости от угла рассогласования θ по формуле (14.5):

$$\begin{aligned}
 M &= \frac{3}{4} \frac{1,02 \cdot 10^4}{2\pi f} \times \\
 &\times E_\Phi^2 \frac{x'_q \sin \theta}{\left[\frac{r'_d + r'_q}{2} - \frac{r'_d - r'_q}{2} \cos \theta \right]^2 + \left[\frac{x'_d + x'_q}{2} - \frac{x'_d - x'_q}{2} \cos \theta \right]^2} = \\
 &= \frac{3}{4} \frac{1,02 \cdot 10^4}{2\pi \cdot 50} 31,7^2 \times \\
 &\times \frac{25,7 \cdot \sin \theta}{\left[\frac{18,2 + 14,4}{2} - \frac{18,2 - 14,4}{2} \cos \theta \right]^2 + \left[\frac{17 + 25,7}{2} - \frac{17 - 25,7}{2} \cos \theta \right]^2} = \\
 &= 6,26 \cdot 10^5 \frac{\sin \theta}{(16,3 - 1,9 \cos \theta)^2 + (21,4 + 4,4 \cos \theta)^2}.
 \end{aligned}$$

θ	10	30	60	90	120	150	180
$\sin \theta$	0,173	0,5	0,867	1,0	0,867	0,5	0
$\cos \theta$	0,985	0,867	0,5	0	-0,5	-0,867	-1,0
$M_{(с.м.)}$	126	370	690	868	803	500	0

По данным табл. 9 на рис. 172 построена кривая синхронизирующего момента селсина $M=f(\theta)$ при работе от одно-типного датчика.

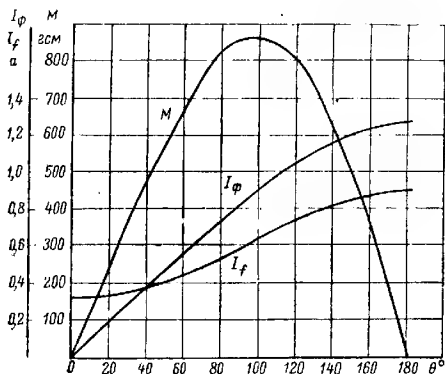


Рис. 172. Кривые зависимости синхронизирующего момента, тока возбуждения и фазного тока от угла рассогласования.

3. Производим расчет максимального фазного тока в зависимости от угла рассогласования по формуле (14.9)

$$I_{\phi \max} = \frac{E_{\phi} \sin \theta/2}{\left[\left(\frac{r'_d + r'_q}{2} - \frac{r'_d - r'_q}{2} \cos \theta \right)^2 + \left(\frac{x'_d + x'_q}{2} - \frac{x'_d - x'_q}{2} \cos \theta \right)^2 \right]^{1/2}} =$$

$$= \frac{31,7 \sin \theta/2}{[(16,3 - 1,9 \cos \theta)^2 + (21,4 + 1,4 \cos \theta)^2]^{1/2}} a..$$

Результаты расчета фазного тока приведены в табл. 10. По данным этой таблицы на рис. 172 построена кривая фазного тока $I_\phi = f(\theta)$ при работе от однотипного датчика.

Таблица 10

θ	10	30	60	90	120	150	180
$\sin \theta/2$	0,0865	0,259	0,5	0,707	0,867	0,967	1,0
$I_\phi(a)$	0,093	0,28	0,56	0,83	1,06	1,23	1,28

4. Определяем сопротивление взаимной индукции x_{af} [29]:

$$x_{af} = x_{fd} \frac{w_2 k_{w2}}{w_1 k_\phi} = 284 \frac{378 \cdot 0,9}{1100 \cdot 0,873} = 103 \text{ ом.}$$

5. Находим полное сопротивление обмотки возбуждения

$$\begin{aligned} \dot{z}_f &= R_1 + j(x_1 + x_{fs2} + x_{fd}) = 27,2 + j(17,1 + 31 + 284) = \\ &= (27,2 + j332) \text{ ом.} \end{aligned}$$

Величины R_1 , x_1 , x_{fs2} , x_{fd} указаны, соответственно, в пунктах Г — 6, Г — 8, Е — 3 и Е — 4 настоящего параграфа.

6. находим ток возбуждения $\dot{I}_f$ при различных углах рас-
согласования θ по формуле (14.7):

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{U}_1}{\dot{z}_f} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{x_{af}^2}{\dot{z}_f} \frac{\sin^2 \theta/2}{r + j[x_c(j) - x_u(j) \cos \theta]} \right],$$

где

$$x_c(j) = \frac{x_d(j) + x_q(j)}{2}; \quad x_u(j) = \frac{x_d(j) - x_q(j)}{2},$$

$$jx_d(j) = r'_d + jx'_d - r = 18,2 + j17 - 14,4 = 3,8 + j17;$$

$$jx_q(j) = r'_q + jx'_q - r = 14,4 + j25,7 - 14,4 = j25,7;$$

$$jx_c(j) = 1,9 + j21,4; \quad jx_u(j) = 1,9 - j4,4;$$

$$\begin{aligned} \dot{I}_f &= \frac{110}{27,2 + j332} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{103^2}{27,2 + j332} \times \right. \\ &\quad \left. \times \frac{\sin^2 \theta/2}{16,3 - 1,9 \cos \theta + j(21,4 + 4,4 \cos \theta)} \right]. \end{aligned}$$

Результаты расчета по этой формуле тока I_f для $\theta = 0, 30, 60, 90, 120, 150$ и 180° приведены в табл. 11.

По данным этой таблицы на рис. 172 построена кривая зависимости тока возбуждения от угла рассогласования $I_f = f(\theta)$.

Таблица 11

θ	0	30	60	90	120	150	180
$\sin^2 \theta/2$	0	0,067	0,25	0,5	0,75	0,93	1,0
$\cos \theta$	1,0	0,867	0,5	0	-0,5	-0,867	-1,0
$I_f(a)$	0,33	0,36	0,46	0,59	0,74	0,85	0,89

Расчет времени затухания не производится, так как электрическое демпфирование в бесконтактном селсине отсутствует. Гашение колебаний ротора осуществляется путем установки механического демпфера.

Глава VIII

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СЕЛСИНОВ

§ 41. СОДЕРЖАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Все экспериментальные исследования, проводимые с селсинами, по своему назначению можно условно подразделить на две группы:

1. Исследовательские испытания.

2. Типовые и контрольные испытания.

Исследовательские испытания проводятся:

а) при разработке новых селсинов с целью получения их рабочих характеристик и параметров;

б) при внесении значительных конструктивных и технологических изменений, позволяющих получить лучшие характеристики селсинов;

в) при изучении новых схем и методов измерения и т. д.

Программа исследовательских испытаний весьма обширна и имеет целью детальное изучение всех основных характеристик и параметров селсина. Исследовательские испытания, как правило, проводятся в лабораториях научных учреждений и заводов, разрабатывающих селсины. В результате проведения исследовательских испытаний устанавливается соответствие макетных и опытных образцов селсинов требованиям технического задания, по которому производится проектирование, и определяются основные эксплуатационные характеристики селсинов. По результатам этих испытаний делают выводы о пригодности данного типа селсина для эксплуатации и целесообразности запуска его в производство. Иногда исследовательские испытания проводят не всесторонние, а по определенному целевому назначению.

Типовые и контрольные испытания имеют цель установить соответствие данных образцов селсинов требованиям технических условий на их изготовление. Типовые и контрольные испытания проводятся на заводах, изготавливающих селсины. Контрольным испытаниям подвергается каждый селсин, выпускаемый заводом-изготовителем.

Типовые испытания проводятся на заводе-изготовителе только периодически в сроки, определяемые техническими условиями, а также при внесении в конструкцию или техно-

логию изготовления селсинов существенных изменений, могущих повлиять на характеристики селсинов. Относительно разграничения программы контрольных и типовых испытаний весьма трудно дать исчерпывающие рекомендации для всех случаев. В программу контрольных испытаний должна входить проверка таких показателей селсинов, которые могут сильно изменяться от образца к образцу в процессе их изготовления, а в программу типовых испытаний — проверка таких показателей, которые свойственны всем селсинам данного типа и не могут заметно изменяться от образца к образцу. Показателем селсинов, значительно изменяющимся от образца к образцу, является, например, статическая погрешность, величина которой зависит от технологии изготовления и сочетания допусков в различных селсинах данного типа. Примером показателя, незначительно изменяющегося от образца к образцу, может служить вес селсина. Очевидно, что проверка статической погрешности должна входить в контрольные испытания, а проверка веса — в типовые.

В комплексе экспериментальных испытаний селсинов можно выделить две группы экспериментов:

- а) свойственных для испытаний любых электроэлементов;
- б) имеющих специфический для селсинов характер.

К первой группе относятся определения:

- а) потребляемых тока и мощности;
- б) омического сопротивления и сопротивления изоляции обмоток;
- в) температуры перегрева обмоток;
- г) испытания на долговечность, влагостойкость, вибрацию, тряску и т. п.

Ко второй группе относятся определения:

- а) электрической асимметрии;
- б) удельной мощности и параметров селсина;
- в) удельного и синхронизирующего моментов;
- г) момента трения и давления щеток (для контактных селсинов);
- д) реактивных моментов;
- е) статических и динамических ошибок селсинов;
- ж) времени затухания колебаний при согласовании;
- з) зависимости тока возбуждения и фазного тока от угла рассогласования.

Приведем некоторые методические указания по испытаниям, относящимся к экспериментам первой группы.

Потребляемые ток и мощность селсина измеряются при номинальных напряжении и частоте. Так как селсины обычно потребляют небольшие мощности (от единиц до нескольких десятков ватт), то при измерениях почти всегда следует учитывать потери в приборах. Эти потери иногда могут достигать такой же величины, что и мощность, по-

требляемая селсином. В некоторых случаях, при отсутствии точного ваттметра, особенно при повышенных частотах (400—500 гц), можно рекомендовать способ измерения потребляемой мощности при помощи амперметра, вольтметра и магазина емкостей, включенных по схеме, приведенной на рис. 173. В этой схеме подбором величины емкости C добиваются минимального показания амперметра и определяют потребляемую селсином мощность по формуле

$$P_1 = I_{\min} \cdot U - \frac{U^2}{R_b},$$

R_b — сопротивление вольтметра.

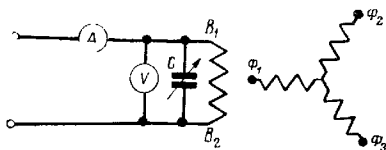


Рис. 173. Схема для определения потребляемой мощности.

Температура перегрева обмоток селсинов определяется исключительно методом сопротивления. При испытаниях селсин укрепляется на теплоотводящем основании, размеры которого выбираются, исходя из условий креплений селсина в приборе, и определяются техническими условиями. Продолжительность испытания также оговаривается техническими условиями. В течение указанного времени селсин находится под током, после чего снимается кривая охлаждения, характеризующая изменение сопротивления обмотки возбуждения в течение первых нескольких минут после отключения от сети. Путем экстраполяции этой кривой к моменту отключения определяется сопротивление обмотки возбуждения в момент отключения и по нему определяется перегрев обмотки возбуждения. Однако можно применять и другой способ, при котором снимается кривая нагревания, характеризующая изменение сопротивления обмотки возбуждения с момента включения селсина в сеть до момента выключения селсина из сети. Для этого собирается схема с переключением обмотки возбуждения с сети на мост для измерения сопротивления, дающая возможность производить через определенные промежутки времени измерение сопротивления обмотки возбуждения. По результатам этих измерений строится кривая изменения сопротивления, по ней определяется установившееся значение сопротивления, по которому рассчитывается перегрев обмотки. При желании оба метода могут быть применены одновременно.

§ В настоящей главе рассматриваются подробно методы исследования селсинов, относящиеся ко второй группе экспериментов.

Поскольку селсины могут использоваться в различных режимах работы — индикаторном и трансформаторном, и в каждом из этих режимов выполнять различное назначение — датчика или приемника, то экспериментальные испытания селсинов также различны. Так, например, для датчиков индикаторных и трансформаторных синхронных передач могут не производиться испытания, указанные в пп. „в“ „д“ „е“ и „ж“.

Содержание экспериментальных испытаний трансформаторных селсинов-приемников существенно отличается от испытаний индикаторных селсинов-приемников. Для них не имеет смысла проводить испытания, перечисленные в пп. „б“, „в“, „д“ и „ж“. Вместо этого определяются крутизна выходной (управляющей) э. д. с., удельная мощность при оптимальной нагрузке, выходное сопротивление и др. Описание методов испытаний трансформаторных селсинов-приемников выделено в отдельный параграф.

§ 42. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АСИММЕТРИИ

Электрическая асимметрия определяется для селсинов-датчиков и трансформаторных селсинов-приемников. Она характеризуется собой симметрию электрических параметров трехфазной обмотки. В идеальном случае линейные э. д. с. трехфазной обмотки возбужденного селсина должны быть совершенно идентичны, изменяться по синусоидальному закону от угла поворота ротора, и сдвинуты друг относительно друга на угол, равный 120° . Однако в силу различных технологических погрешностей и несинусоидальности распределения обмотки селсина оказываются несимметричными, что приводит к отклонению линейных напряжений от указанных выше зависимостей. При этом нарушается как синусоидальная зависимость линейных э. д. с. от угла поворота, так и их взаимное смещение на углы по 120° . Проверка всех трех линейных э. д. с. по всей окружности представляет собой сложную задачу, решение которой весьма громоздко, вследствие чего подобная проверка не может быть рекомендована для применения в заводских условиях. Ее возможно выполнить только при исследовательских испытаниях в лабораторных условиях.

Поэтому практически ограничиваются проверкой некоторых точек кривых линейных э. д. с. обмотки синхронизации — 6, 12, 24 и т. д.

Наиболее существенным является выполнение синусоидальных зависимостей и сдвига напряжений по углу на 120° трехфазной обмотки вблизи точек, соответствующих нулевым значениям напряжения. В точках, соответствующих максималь-

ным значениям напряжения, точная проверка синусоидальности кривых линейных напряжений весьма затруднительна, так как изменение угла даже на $1-2^\circ$ практически не сказывается на величине напряжения. Поэтому при проверке симметричности линейных э. д. с. ограничиваются участками кривых вблизи точек с нулевым напряжением. Одним из наиболее простых является метод проверки шести точек, дающий удовлетворительные для практики результаты. Для проверки берут

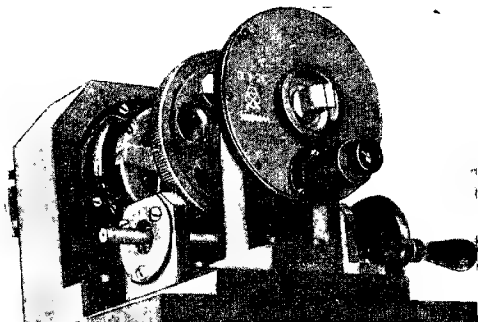


Рис. 174. Макет с оптическим лимбом.

точки, в которых линейные э. д. с. равны нулю. Этот метод называют также методом нулевых напряжений или методом нулевых точек. В идеальном случае положения ротора селсина, при которых линейные напряжения селсина равны нулю, должны быть сдвинуты одно относительно другого на 60° , т. е. расположены на углах $0, 60, 120, 180, 240$ и 300° .

Отклонение от этих положений нулевых точек реального селсина, выраженное в угловых градусах или минутах, характеризует асимметрию линейных э. д. с. За величину электрической асимметрии принимают полусумму абсолютных значений наибольших отклонений различных знаков.

Проверка электрической асимметрии по 6 точкам производится следующим образом. Селсин устанавливается в макет, допускающий отсчет углов поворота ротора с точностью до нескольких минут. На рис. 174 изображен макет с оптическим лимбом, позволяющий отсчитывать углы с точностью до одной минуты. К фазам синхронизирующей обмотки возбужденного селсина поочередно подключается ламповый вольтметр (рис. 175) и определяются угловые положения ротора селсина, соответ-

ствующие нулевым значениям линейных напряжений. По этим данным определяют электрическую асимметрию по 6 точкам.

Число проверяемых точек можно увеличить, если включить делители напряжений из активных сопротивлений по схеме, указанной на рис. 176. Сопротивления R (по несколько тысяч омов) должны быть совершенно одинаковыми. Устанавливая переключатель поочередно в положения 1, 2, 3, ..., 12 и поворачивая ротор селсина, добиваются для каждого из этих положений нулевых показаний лампового вольтметра. Таким образом электрическая асимметрия может быть проверена для 12 точек, отстоящих одна от другой на 30° .

Описанный метод определения электрической асимметрии, при питании селсина со стороны обмотки возбуждения, принят для датчиков, так как он соответствует режиму работы селсина в системе синхронной передачи.

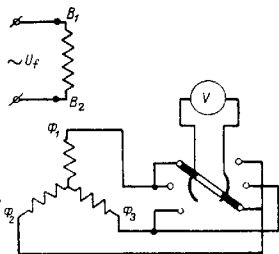


Рис. 175. Схема для определения электрической асимметрии датчика в 6 точках.

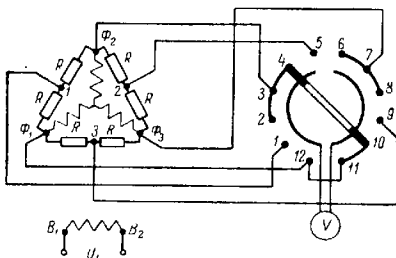


Рис. 176. Схема для определения электрической асимметрии датчика в 12 точках.

Для трансформаторных селсннов-приемников электрическая асимметрия определяется по 12 точкам при намагничивании селсина со стороны трехфазной обмотки. Для этого подключают к сети переменного тока трехфазную обмотку, как указано на рис. 177, а и б. Для каждого подключения

определяют угловое положение ротора, при котором э. д. с. на однофазной обмотке селсина равна нулю. Всего получают 12 положений, которые в идеальном случае должны отстоять одно от другого на 30° . В действительности, положения, соответствующие нулевым значениям э. д. с., отстоят на углы, отличные от 30° . Полусумма абсолютных значений наибольших отклонений различных знаков принимается за величину электрической асимметрии селсина.

Следует отметить, что не все рассмотренные методы определения электрической асимметрии позволяют выявить асим-

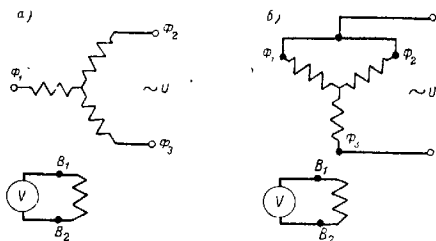


Рис. 177. Схемы для определения электрической асимметрии трансформаторного селсина-приемника: а — при наличии двух фаз; б — при наличии трех фаз.

метрию, обусловленную высшими гармоническими в кривой э. д. с. Действительно, как было показано в § 31, фазные значения э. д. с. с учетом высших гармонических изменяются от угла поворота ротора селсина по закону:

$$\begin{aligned}\dot{E}_A &= \dot{E}_1 \sum_{n=1,3,5,7,\dots} a_n \cos n\gamma; \\ \dot{E}_B &= \dot{E}_1 \sum_{n=1,3,5,7,\dots} a_n \cos n(\gamma - 120^\circ); \\ \dot{E}_C &= \dot{E}_1 \sum_{n=1,3,5,7,\dots} a_n \cos n(\gamma + 120^\circ),\end{aligned}$$

где γ — угол между осью фазы А и осью обмотки возбуждения;

a_n — коэффициенты, характеризующие уровень высших гармонических в кривой э. д. с. [см. формулы (31.19)].

Отсюда для линейных значений э. д. с. получим

$$\dot{E}_{AB} = \dot{E}_B - \dot{E}_A = \sqrt{3}\dot{E}_1 [\sin(\gamma - 60^\circ) - a_5 \sin(5\gamma + 60^\circ) + a_7 \sin(7\gamma - 60^\circ) + \dots];$$

$$\dot{E}_{BC} = \dot{E}_C - \dot{E}_B = \sqrt{3}\dot{E}_1 [-\sin \gamma + a_5 \sin 5\gamma - a_7 \sin 7\gamma + \dots];$$

$$\dot{E}_{CA} = \dot{E}_A - \dot{E}_C = \sqrt{3}\dot{E}_1 [\sin(\gamma + 60^\circ) - a_5 \sin(5\gamma - 60^\circ) + a_7 \sin(7\gamma + 60^\circ) + \dots].$$

Из этих формул следует, что при тех углах γ , при которых обращается в нуль первая гармоника кривой э. д. с., ($\gamma = -60^\circ, 0^\circ + 60^\circ$ и т. д.), обращаются в нуль и высшие гармонические.

Поэтому для выяснения влияния высших гармонических на величину электрической асимметрии необходимо проверить синусоидальность кривых на некотором участке. В качестве проверяемых участков наиболее целесообразно взять участки синусоид, прилегающие к нулевым значениям. При этом можно ограничиться проверкой каждой синусоидальной кривой на двух интервалах по 60° .

На рис. 178 участки синусоид, подвергающиеся проверке, выделены жирными линиями. Для проверки синусоидальности отдельных участков кривых используется компенсационная схема (рис. 179).

С помощью потенциал-регулятора ПР при полностью введенном делителе напряжений ДН производится компенсация линейного напряжения двух фаз селсина и напряжения ПР. Если напряжения селсина и потенциал-регулятора несколько различаются по фазе, то в цепь возбуждения селсина или потенциал-регулятора необходимо для фазировки включить активное сопротивление. В качестве нуля-индикатора берется ламповый вольтметр или электронный осциллограф. Синусоидальность кривой проверяется для пяти значений напряжений 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 и 0,5 от U_m , устанавливаемых с помощью делителя напряжений. Эти значения напряжений соответствуют углам поворота ротора селсина $5^\circ 44'$, $11^\circ 32'$, $17^\circ 28'$, $23^\circ 35'$ и $30^\circ 00'$ относительно положения, при котором линейное напряжение равно нулю. Аналогичные операции проводятся для двух других линейных напряжений. Для них соответствующие

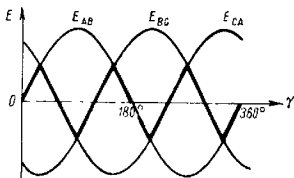


Рис. 178. Линейные напряжения обмотки синхронизации.

углы поворота ротора должны быть сдвинуты на $\pm 120^\circ$. Отклонения положения ротора селсина от вычисленных значений характеризуют электрическую асимметрию селсина.

С помощью описанного метода можно определить электрическую асимметрию селсина по 60 точкам. Поэтому его называют — метод 60 точек.

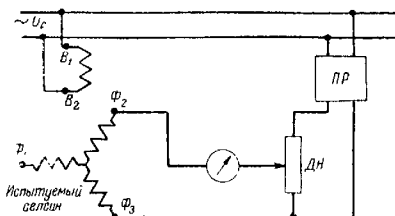


Рис. 179. Компенсационная схема для определения электрической асимметрии датчика в 60 точках.

У большинства селсинов распределение обмотки и полюсная дуга выбраны так, что высшие гармонические, обусловленные несинусоидальностью м. д. с., сведены к минимуму и не превышают нескольких минут.

Таблица 12

Класс точности	Электрическая асимметрия, в град.
1	не более 0,25
2	0,25 ÷ 0,5
3	0,5 ÷ 1,0

В таких селсинах определяющее влияние на величину электрической асимметрии имеют всякого рода технологические погрешности при изготовлении, и поэтому электрическая асимметрия достаточно точно определяется по методу 6 или 12 точек. Более объективную оценку электрической асимметрии дает метод 12 точек.

В зависимости от величины электрической асимметрии селсины-датчики и трансформаторные селсины-приемники зачастую разделяются на три класса точности (табл. 12).

§ 43. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И ПАРАМЕТРОВ СЕЛСИНА

В § 13 было введено понятие удельной мощности, как полной электромагнитной мощности поперечной цепи селсинов в системе парной синхронной связи при рассогласовании на 1° . Выраженная в мва/град^2 удельная мощность определяется формулой

$$P_q = 0,457 \frac{E_\Phi^2}{z_q} \cdot \frac{\text{мва}}{\text{град}^2}. \quad (43.1)$$

Для экспериментального определения удельной мощности собирают схему согласно рис. 180, а селсин устанавливают в макет, допускающий отсчет углов с точностью 0,2—0,3°.

Установив переключатель в положение 1 (на зажимы вольтметра), определяют максимальное линейное напряжение U_{Δ} , после чего поворотом ротора добиваются минимального показания вольтметра и в этом положении ротора устанавливают переключатель в положение 2 (на зажимы амперметра). Медленно поворачивая ротор, находят по амперметру нулевое положение ротора, при котором амперметр дает минимальное отклонение. Заметив это положение по шкале макета, в котором установлен селсин, поворачивают на определенный угол α ротор селсина и производят отсчет значения тока I_k по шкале амперметра. Угол α обычно берется в пределах 5÷10°.

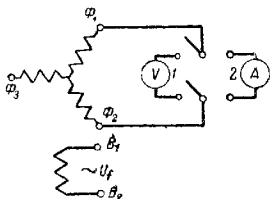


Рис. 180. Схема для определения удельной мощности селсина

Имеем

$$I_k = \frac{U_{\Delta} \sin \alpha}{2z_q}; \quad E_{\Phi} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}}.$$

Подставляя эти выражения в формулу (43.1) вместо E_{Φ} и z_q и считая угол α малым, получим

$$P_q = 0,457 \cdot \frac{2}{3} \frac{U_{\Delta} I_k}{\alpha}$$

или, выражая угол α в градусах,

$$P_q = 17,5 \frac{U_{\Delta} I_k}{\alpha^2} \frac{\text{мва}}{\text{град}^2}. \quad (43.2)$$

По измеренным значениям U_{Δ} , I_k и α легко определяют удельную мощность селсина.

В табл. 13 приведены значения удельной мощности для некоторых типов контактных и бесконтактных индикаторных селсинов, предназначенных для питания от сети 50 гц.

Таблица 13

Тип селсина	ДИ-404	НД-404	НД-501	НД-511	НД-521	БД-404	БД-501
Удельная мощность в мва/град ²	6,0	17,7	60	126,5	281	6,2	43

В числе параметров, характеризующих индикаторные селсины, наиболее важное значение имеют параметры r , r'_q , x'_q , r'_d , x'_d , так как они определяют величины удельного, синхронизирующего и демпферного моментов селсина.

Активное сопротивление r при обычных частотах совпадает с омическим сопротивлением фазы синхронизирующей обмотки и измеряется с помощью моста сопротивлений.

Для определения полных сопротивлений фазы синхронизирующей обмотки по продольной и поперечной осям $\dot{z}'_d = r'_d + jx'_d$; $\dot{z}'_q = r'_q + jx'_q$ существует несколько методов, основанных на следующих очевидных соотношениях:

а) если ротор селсина расположен так, что э. д. с. на его двух фазах синхронизирующей обмотки равна нулю, то полное сопротивление этих двух фаз равно $2\dot{z}'_q = 2(r'_q + jx'_q)$;

б) если ротор селсина расположен так, что э. д. с. двух фаз синхронизирующей обмотки максимальна (это положение ротора отличается на 90° от предыдущего), то полное сопротивление этих двух фаз равно $2\dot{z}'_d = 2(r'_d + jx'_d)$ при разомкнутой обмотке возбуждения и $2\dot{z}'_d = 2(r'_d + jx'_d)$ при замкнутой накоротко обмотке возбуждения.

В экспериментальной практике используются следующие методы определения параметров селсина:

1) измерение параметров с помощью моста переменного тока;

2) измерение параметров по потребляемому току и мощности;

3) компенсационный метод при возбуждении селсина со стороны обмотки возбуждения;

4) компенсационный метод при возбуждении селсина со стороны трехфазной обмотки;

5) измерение параметров по значению тока в цепи синхронизации при работе от однотипного датчика.

При первом методе с помощью моста переменного тока измеряют сопротивление и индуктивность двух фаз для двух положений ротора, указанных выше. По полученным значениям сопротивлений, индуктивностей и рабочей частоте моста переменного тока f рассчитывают параметры фазы синхронизирующей обмотки. Например, для поперечной оси

$$r'_q = \frac{r_{\text{изм}}}{2}; \quad x'_q = \frac{2\pi f L_{\text{изм}}}{2}. \quad (43.3)$$

Параметры селсинов, предназначенных для питания от сети 50 гц, необходимо измерять мостом его переменного тока частотой 50 гц, а параметры селсинов повышенных частот (400—500 гц) соответственно мостом его переменного тока частотой 400—500 гц. Этот метод измерения параметров сел-

синов по поперечной и продольной осям весьма прост и дает результаты, достаточно точные для ненасыщенной машины. Недостатком метода следует считать невозможность учета влияния насыщения магнитной цепи на параметры селсина, что особенно важно при определении параметров по продольной оси, так как в этом случае всегда существует некоторое насыщение магнитной цепи.

При втором методе собирают схему, как указано на рис. 181, измеряют ток, напряжение и мощность. По полученным значениям тока, напряжения и мощности для положений ротора, указанных в пп. „а“ и „б“, определяют значения параметров. При этом в показания приборов должны быть введены поправки. Так, например, для продольной оси селсина при замкнутой обмотке возбуждения получаем:

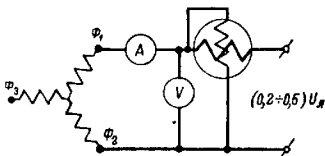


Рис. 181. Схема определения параметров селсина по методу амперметра, вольтметра и ваттметра.

$$\left. \begin{aligned} z'_d &= \frac{U}{2I}; & r'_d &= \frac{P - P_n}{2I^2} - \frac{r_a}{2} \\ x'_d &= \sqrt{z_d'^2 - \left[r'_d + \frac{r_a}{2}\right]^2} - \frac{x_a}{2} \end{aligned} \right\}, \quad (43.4)$$

где r_a — активное сопротивление амперметра;

x_a — реактивное сопротивление амперметра;

P_n — мощность, потребляемая обмоткой параллельной цепи ваттметра и вольтметра.

При измерении необходимо иметь в виду, что напряжение, подводимое к двум фазам, не должно превосходить $0,5 U_n$ во избежание перегрева селсина.

Хотя при определении параметров селсинов по этому методу и может быть учтено влияние насыщения магнитной цепи, все же этот метод дает не всегда достаточно точные результаты, так как точность измерения в весьма сильной степени зависит от точности приборов.

При третьем методе собирают схему согласно рис. 182, аналогично схеме для определения удельной мощности селсина. Вместо амперметра включают эталонное сопротивление, имеющее значение от r до $2r$, где r — омическое сопротивление фазы синхронизирующей обмотки. Селсин устанавливается в макет, допускающий отсчет углов поворота ротора с точностью $0,2-0,3^\circ$. Фазорегулятор (ФР) и обмотка возбуждения селсина включаются в одну и ту же сеть переменного тока.

Установив переключатели в положение I, определяют сначала нулевое положение ротора, для чего устанавливают движок делителем напряжения в крайнее левое положение и поворотом ротора достигают минимального показания по шкале нуль-индикатора НИ. Затем определяют величину и фазу максимального напряжения на зажимах $\Phi_1 \Phi_2$, для чего, повернув

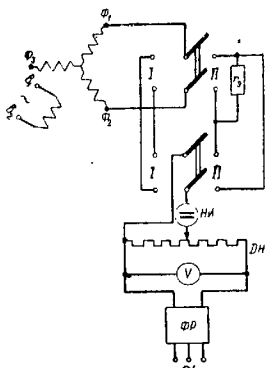


Рис. 182. Схема компенсационного метода определения параметров селсина при питании со стороны обмотки возбуждения.

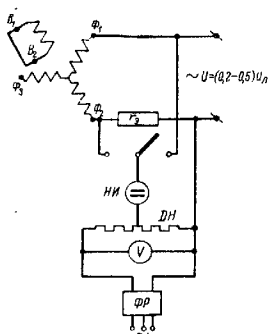


Рис. 183. Схема компенсационного метода определения параметров селсина при питании со стороны трехфазной обмотки.

ротор селсина по шкале макета от нулевого положения на 90° , перемещением движка делителя ДН и поворотом ротора ФР добиваются минимального показания индикатора НИ. После этого, установив переключатели в положение II, с помощью делителя напряжений ДН и фазорегулятора ФР измеряют падение напряжения на сопротивлении r_s , $\dot{U}_s = I \dot{r}_s$ как по величине, так и по фазе для двух угловых положений ротора: $\alpha = 5 + 10^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$ (угол α отсчитывается от нулевого положения). По результатам первого измерения определяют поперечное сопротивление, а по результатам второго — продольное сопротивление.

Значения параметров селсина вычисляют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}'_q &= r'_q + jx'_q = \left(\frac{\dot{U}_a \sin \alpha}{\dot{U}_{sq}} - 1 \right) \frac{r_s}{2} \\ \dot{z}'_d &= r'_d + jx'_d = \left(\frac{\dot{U}_a}{\dot{U}_{sd}} - 1 \right) \frac{r_s}{2} \end{aligned} \right\} \quad (43.5)$$

В качестве нуль-индикатора в компенсационной схеме используется ламповый вольтметр, катодный осциллоскоп или другой достаточно чувствительный прибор. Во избежание перегрева обмотки возбуждения определение параметров r'_d и x'_d может быть сделано при пониженном напряжении возбуждения.

По четвертому методу возбуждение селсина осуществляется со стороны трехфазной обмотки (рис. 183). При этом подводимое напряжение не должно превышать $0,5 U_n$. Последовательно с фазами синхронизирующей обмотки включается эталонное сопротивление r_s , равное $r + 2r$, где r — активное сопротивление фазы синхронизирующей обмотки.

С помощью компенсационной схемы, состоящей из делителя напряжений ДН и фазорегулятора ФР, определяют значения приложенных напряжений $\dot{U}_q$ и $\dot{U}_d$ и падений напряжений на эталонном сопротивлении $\dot{U}_{sq}$ и $\dot{U}_{sd}$ как по величине, так и по фазе для двух положений ротора: поперечного и продольного. Поперечное положение соответствует значению э. д. с. на обмотке возбуждения, равному нулю, а продольное положение отстоит от него на 90° . При определении параметров r'_d и x'_d обмотку возбуждения селсина закорачивают.

Параметры селсина вычисляют по формулам:

$$\left. \begin{aligned} \dot{z}'_q &= r'_q + jx'_q = \left(\frac{\dot{U}_q}{\dot{U}_{sq}} - 1 \right) \frac{r_s}{2} \\ \dot{z}'_d &= r'_d + jx'_d = \left(\frac{\dot{U}_d}{\dot{U}_{sd}} - 1 \right) \frac{r_s}{2} \end{aligned} \right\}. \quad (43.6)$$

При разомкнутой обмотке возбуждения и продольном положении ротора селсина этим методом определяют параметры r'_d и x'_d .

По пятому методу параметры селсина измеряют непосредственно в схеме парной синхронной связи при работе селсин-приемника от одиотипного датчика. Определение параметров основано на использовании формулы (14.8) для тока в цепи синхронизации селсинов. Максимальное значение тока в фазе получается при $\gamma = \frac{\pi}{2} - \frac{\theta}{2}$ и равно

$$i_{\Phi m} = \frac{\dot{E}_\Phi \sin \theta/2}{\frac{r'_d + r'_q}{2} - \frac{r'_d - r'_q}{2} \cos \theta + j \left(\frac{x'_d + x'_q}{2} - \frac{x'_d - x'_q}{2} \cos \theta \right)}.$$

Из этой формулы следует, что при малых углах $\theta_1 < 10^\circ$

$$\cos \theta_1 \approx 1 \text{ и } I_{\Phi m1} = \frac{\dot{E}_\Phi \sin \theta_1/2}{r'_q + jx'_q};$$

при $\theta_2 = 180^\circ$

$$I_{\Phi m2} = \frac{\dot{E}_\Phi}{r'_d + jx'_d}.$$

Следовательно, имеем

$$z'_q = r'_q + jx'_q = \frac{\dot{E}_\Phi \sin \theta_1/2}{I_{\Phi m1}};$$

$$z'_d = r'_d + jx'_d = \frac{\dot{E}_\Phi}{I_{\Phi m2}}.$$

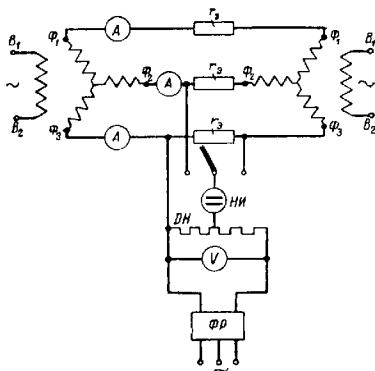


Рис. 184. Схема компенсационного метода определения параметров по значению тока в цепи синхронизации при работе от однотипного датчика.

где $I_{\Phi m1}$ и $I_{\Phi m2}$ — максимальные фазные токи соответственно при $\theta = \theta_1 < 10^\circ$ и $\theta = \theta_2 = 180^\circ$.

Из этих формул легко видеть, что для определения z'_q и z'_d достаточно определить по величине и по фазе $\dot{E}_\Phi$, $I_{\Phi m1}$ и $I_{\Phi m2}$.

Для измерения тока в фазах синхронизирующей обмотки с помощью компенсационной схемы в цепь синхронизации включают три одинаковых эталонных сопротивления r_3 (рис. 184). Измеряют величины и фазы максимального значения линейного напряжения $\dot{U}_\Delta = \sqrt{3} \dot{E}_\Phi$ в согласованном положении и падение

напряжения на эталонном сопротивлении $\dot{U}_s = \dot{I}_{\phi m} r_s$ для указанных выше углов рассогласования. Положение селсинов, при котором в данной фазе ток имеет максимальное значение, находят путем одновременного поворота роторов датчика и приемника при сохранении угла рассогласования. По полученным значениям $\dot{U}_{s1}$ и $\dot{U}_{s2}$ для углов рассогласования $5 \div 10^\circ$ и 180° вычисляют фазные токи

$$\dot{I}_{\phi m1} = \frac{\dot{U}_{s1}}{r_s}; \quad \dot{I}_{\phi m2} = \frac{\dot{U}_{s2}}{r_s}.$$

Подставив $\dot{I}_{\phi m1}$ и $\dot{I}_{\phi m2}$ в формулы для определения $\dot{z}'_q$ и $\dot{z}'_d$, получаем:

$$\dot{z}'_q = r'_q + jx'_q = \left(\frac{\dot{U}_s \sin \theta_{1/2}}{\sqrt{3} \dot{U}_{s1}} - \frac{1}{2} \right) r_s;$$

$$\dot{z}'_d = r'_d + jx'_d = \left(\frac{\dot{U}_s}{\sqrt{3} \dot{U}_{s2}} - \frac{1}{2} \right) r_s.$$

Для большей точности измерений целесообразно снять кривые $U_s = f(\theta)$ и $\arg \dot{U}_s = \varphi(\theta)$ и по ним находить значение $\dot{U}_s$ для данного угла рассогласования.

Таблица 14

Тип селсина	Поперечная ось		Продольная ось	
	$r'_{q'}$ ОМ	$x'_{q'}$ ОМ	$r'_{d'}$ ОМ	$x'_{d'}$ ОМ
СС-404	53	40	60	17
НС-404	19,4	14,8	23	6,0
НС-501	4,6	2,6	4,8	2,6
НД-501	4,4	3,8	4,2	2,1
БС-404	38,0	40	43	38
БС-501	2,3	5,1	2,8	5,0

В табл. 14 приведены значения параметров некоторых типов селсинов, измеренных по четвертому методу.

§ 44. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО МОМЕНТА, КРИВОЙ синхронизирующего момента, времени затухания при согласовании, тока возбуждения и фазного тока

Удельный и синхронизирующий моменты, а также время затухания селсина-приемника определяются:

- при работе одного приемника от однотипного датчика;
- при параллельной работе нескольких приемников от одного датчика;

в) при работе в схеме ССП с электрическим дифференциалом.

Определение удельного момента и снятие кривой синхронизирующего момента для случая „а“ производится следующим образом: селсин-приемник устанавливается в макет, снабженный шкалой, имеющей деления через 1° .

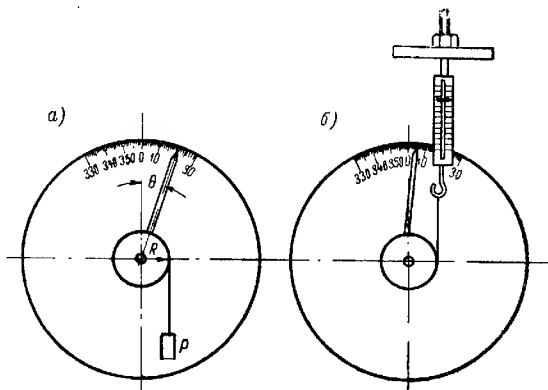


Рис. 185. Измерение синхронизирующего момента: а — с помощью шкива и груза; б — с помощью динамометра.

На оси ротора приемника устанавливается и закрепляется шкивок со стрелкой (см. рис. 185, а). Селсин-датчик устанавливается в другой макет, снабженный фиксирующим устройством, и его ротор надежно закрепляется. Собирается схема синхронной передачи, включается в сеть переменного тока, с номинальным напряжением и частотой, и поворотом статора приемника или любым другим способом стрелка приемника устанавливается против нулевого деления шкалы. Затем последовательно подвешивая к иити на шкиве приемника грузы различной величины, определяют для каждого из них угол поворота ротора от нулевого положения. Синхронизирующий момент определяется как произведение величины груза на радиус шкива

$$M = P \cdot R \text{ гсм},$$

где P — вес груза, г;
 R — радиус шкива, см.

Удельный момент определяется как частное от деления синхронизирующего момента на угол рассогласования (для углов $\theta = 3 \div 5^\circ$)

$$m = \frac{M}{\theta^\circ} = \frac{PR}{\theta^\circ} \frac{\text{гсм}}{\text{град}}.$$

Таким методом можно снимать только восходящую ветвь кривой синхронизирующего момента, так как при значении груза, соответствующем максимальной величине синхронизирующего момента, происходит срыв. Однако в некоторых случаях необходимо определить нисходящую ветвь кривой синхронизирующего момента, для чего пользуются динамометром. Корпус последнего устанавливается на жестком основании, а его подвижная часть при помощи нити связывается со шкивом на оси селсина-приемника (рис. 185, б). Установка должна обеспечивать возможность перемещения корпуса динамометра.

Жесткость динамометра должна быть выбрана так, чтобы удельный момент, создаваемый им на оси селсина, был больше удельного момента самого селсина (рис. 186). Удельный момент, создаваемый динамометром на оси селсина, равен

$$m_d = \frac{P_d R}{\theta^\circ}, \quad \text{а } P_d = kx = \frac{2\pi R}{360^\circ} \theta^\circ k = \frac{\pi R}{180^\circ} k \theta^\circ;$$

следовательно,

$$m_d = \frac{\pi R^2}{180^\circ} k \frac{\text{гсм}}{\text{град}},$$

где P_d — сила, создаваемая динамометром, г;
 x — перемещение подвижной части динамометра, см;
 k — жесткость динамометра, г/см;
 R — радиус шкива, см.

Снятию нисходящей ветви кривой синхронизирующего момента производится следующим образом. Первоначально смещением корпуса динамометра совмещают нулевое положение динамометра (сила, создаваемая динамометром, равна нулю) с углом $\theta = 180^\circ$ селсина. В этом положении селсин не создает синхронизирующего момента и поэтому подвижная часть динамометра остается в нулевом положении (см. рис. 186, прямая 1). После этого смещением корпуса динамометра совмещают его нулевое положение с углом θ_1 шкалы селсина. Так как в этом положении селсин создает некоторый синхронизирующий момент, то он повернет шкивок на некоторый угол и установит его в положение θ_2 , при котором моменты, создаваемые динамометром и селсином, равны. Ротор селсина, а с ним и шкивок дальше повернуться не могут, так как за пределами этой области момент, создаваемый динамометром, больше момента селсина (см. рис. 186, прямая 2). Затем совмещают нулевое

положение динамометра с углом θ_3 шкалы. Под воздействием синхронизирующего момента селсина шкивок поворачивается до угла θ_4 и т. д. Для каждого из равновесных положений θ_2 , θ_4 и т. д. определяют силу P_d по шкале динамометра и рассчитывают момент.

По этому методу может быть снята вся кривая синхронизирующего момента — исходящая и восходящая ветви. Однако рекомендовать метод динамометра для снятия восходящей ветви кривой синхронизирующего момента не следует, так как он сложнее метода шкива с грузом и менее точен.

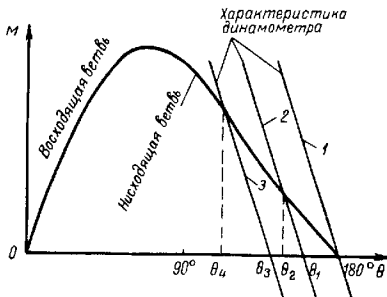


Рис. 186. Снятие неустойчивой части кривой синхронизирующего момента.

Удельный момент селсина-приемника обычно определяется при действии момента вращения груза по часовой стрелке и против нее. Для выявления действия реактивного момента на величину удельного момента последний определяют для нескольких положений ротора датчика. Кривую синхронизирующего момента $M=f(\theta)$ снимают, как правило, при действии момента груза в одном направлении.

Необходимо указать, что кривую момента следует снимать по возможности быстро, чтобы не вызвать чрезмерного перегрева обмоток селсина, что может привести к значительным искажениям результатов опыта. Кроме того, следует обратить внимание на необходимость поддержания постоянства напряжения на зажимах обмотки возбуждения, так как если не принимать меры, то из-за сильного изменения тока возбуждения при увеличении угла рассогласования напряжение будет изменяться.

Для определения удельного момента при параллельной работе все селсины-приемники устанавливаются в макеты со шка-

лами и на осях селсинов укрепляются шкивы со стрелками, а датчик устанавливается в макет с фиксатором. Подвешивая одинаковые грузы одновременно на шкивы всех приемников, определяют углы рассогласования и рассчитывают удельный момент. Подвешивание грузов одинаковой величины возможно только в том случае, если все приемники однотипные. В противном случае необходимо выбрать величину груза для каждого из приемников так, чтобы все приемники были рассогласованы на один и тот же угол относительно датчика. При большом числе параллельно работающих приемников можно применять другой, более простой способ. После предварительного согласования синхронной передачи роторы всех приемников, за исключением одного, закрепляются, а датчик поворачивается на некоторый угол $\theta = 3 \div 5^\circ$. При этом свободный приемник повернется от согласованного положения на некоторый угол. Подвешивая на его шкивок некоторый груз, приводят ротор в первоначальное положение и по величине груза, радиусу шкива и углу поворота датчика определяют удельный момент. Таким же методом можно снимать восходящую ветвь кривой синхронизирующего момента при параллельной работе селсинов. Однако в этом случае обычно довольствуются только определением удельного момента, так как точное снятие кривой момента затруднительно вследствие чрезмерного перегрева датчика при больших углах рассогласования.

При наличии в схеме ССП электрического дифференциала удельный момент и кривая синхронизирующего момента могут быть определены:

а) на оси селсина приемника при закрепленных осях датчика и электрического дифференциала;

б) на оси электрического дифференциала при неподвижных осях других селсинов.

Определение удельного и синхронизирующего моментов производится так же, как и в случае работы одного приемника от однотипного датчика. На рис. 134, 136 и 150 приведены кривые синхронизирующих моментов селсинов СС-404, НС-404 и БС-404 при работе их от однотипного датчика.

Время затухания при согласовании селсинов определяется в тех же макетах, что и удельный и синхронизирующий моменты. Однако в этом случае на ось селсинов-приемников насаживается легкая уравновешенная стрелка для наблюдения за колебаниями ротора. Схема отключается от сети и приемники рассогласовываются относительно датчика на угол 179° . Ротор датчика закрепляется. При включении схемы в сеть приемники согласовываются с датчиком, совершая затухающие колебания около положения согласования. Время от момента включения питания до прекращения колебаний стрелки приемника представляет собой время затухания колебаний при согласовании. Принято считать, что синхронная передача работает вполне удо-

влетворительно, если время затухания не превышает 3—4 сек. Время затухания обычно измеряется при помощи секундомера

Так как в период согласования в синхронной передаче угол рассогласования изменяется периодически, то и ток, потребляемый системой, также будет изменяться периодически в широких пределах. Это предъявляет некоторые требования к схеме испытания. Источник питания должен быть достаточно мощным, а все элементы для регулирования напряжения, включаемые в цепь обмоток возбуждения селсинов,

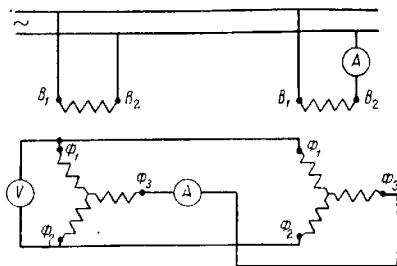


Рис. 187. Схема синхронной передачи для определения тока возбуждения и максимального фазного тока при рассогласовании.

должны обладать небольшими сопротивлениями. Так, например, при определении времени затухания применение для регулирования напряжения реостатов недопустимо. В этом случае следует пользоваться автотрансформаторами, имеющими большую мощность. Эти требования выдвигаются для обеспечения неизменности величины напряжения на обмотке возбуждения селсина в период согласования.

Зависимости тока возбуждения и фазного тока обмотки синхронизации от угла рассогласования могут быть определены для тех же случаев, что и синхронизирующий момент. Однако в большинстве случаев они определяются только для случая работы от датчика одного приемника.

Определение зависимости тока возбуждения от угла рассогласования не представляет каких-либо трудностей. Для этого достаточно включить в цепь обмотки возбуждения датчика или приемника амперметр, рассогласовать приемник относительно датчика на различные углы, и для каждого из них определить по шкале амперметра ток возбуждения.

Определение зависимости максимального фазного тока от угла рассогласования представляет некоторые трудности, ибо,

как показывает формула (14.9), фазный ток зависит не только от угла рассогласования, но и от расположения оси данной фазы относительно обмотки возбуждения. Для определения максимального фазного тока опыт следует производить так, чтобы обеспечивалось условие $\frac{\theta}{2} + \gamma = \frac{\pi}{2}$. Для этого собирают схему синхронной передачи, изображенную на рис. 187, включают вольтметр на зажимы двух фаз обмотки синхронизации (например, Φ_1 и Φ_2), а в третью фазу включают амперметр. Поворотом ротора датчика добиваются максимального показания вольтметра и в этом положении устанавливают стрелки на осях датчика и приемника против нулевых делений шкал. После этого поворачивают роторы датчика и приемника в различных направлениях на одни и те же углы α и для каждого из положений определяют ток по амперметру. При таком повороте угол рассогласования, очевидно равен $\theta = 2\alpha$.

§ 45. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ТРЕНИЯ И РЕАКТИВНЫХ МОМЕНТОВ

Под реактивными моментами селсина-приемника понимаются моменты, возникающие в селсине не за счет угла рассогласования, а за счет зубчатого строения статора и ротора селсина, асимметрии его магнитной цепи и наличия короткозамкнутых витков. Эти моменты в той или иной степени имеются у любого возбужденного селсина и являются функциями углового положения ротора селсина относительно статора. Физическая сущность реактивных моментов была рассмотрена в § 26.

О наличии заметных реактивных моментов в селсине можно судить по величинам момента трения возбужденного и невозбужденного селсинов.

Момент трения селсина измеряется по методу шкива и груза. Согласно этому методу селсин устанавливается в макет и подбирается такой минимальный груз P , при котором ротор селсина поворачивается с любого из занимаемых им положений. Произведение $P \cdot R$ (где R — радиус шкива) представляет собой момент трения селсина.

Если момент трения возбужденного селсина значительно превосходит момент трения невозбужденного, то это указывает на наличие в селсине больших величин реактивных моментов. Если же реактивный момент мал, то обычно момент трения под током оказывается несколько меньше момента трения невозбужденного селсина в силу того, что при возбуждении селсина переменным магнитным полем за счет вибрации уменьшается сухое трение в подшипниках и щетках.

Для измерения реактивного момента селсина может быть использован макет, принципиальная схема которого изобра-

жена на рис. 188. К ротору селсина крепится горизонтально расположенная уравновешенная стрелка, имеющая миллиметровые деления на правом и левом плечах. Вращение стрелки ограничено с двух сторон упорами так, что ее свободное перемещение не превосходит $0,5-1^\circ$. Статор селсина должен поворачиваться на любые углы в пределах 360° . Угол поворота статора определяется с помощью специального верньерного устройства или по шкале, прикрепленной к статору, и неподвижному индексу. При возбуждении селсина под дей-

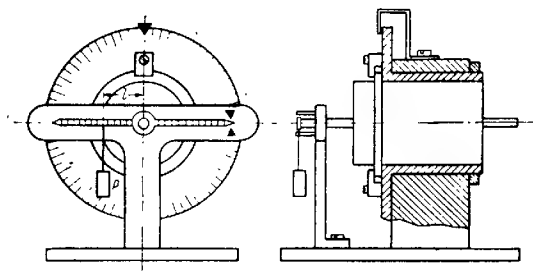


Рис. 188. Принципиальная схема макета для измерения реактивных моментов.

ствием реактивного момента стрелка прижимается к какому-либо из упоров. С помощью груза P , устанавливаемого на том или ином плече стрелки, добиваются начала отрыва стрелки от упора. Полученное значение момента $M = Pl$, где l — длина плеча, отсчитанная по делениям стрелки, представляет собой реактивный момент селсина при данном угловом положении ротора относительно статора. Знак момента устанавливается в зависимости от того, на каком из плеч стрелки (правом или левом) находится груз при отрыве стрелки от упора. Поворачивая статор селсина через угол $3-5^\circ$, можно снять кривую изменения реактивного момента, как функцию угла поворота ротора селсина.

При данном методе измерения реактивного момента вместе с реактивным моментом измеряется и момент трения. Поэтому в бесконтактных селсинах, обладающих малым моментом трения, реактивный момент может быть измерен непосредственно по изложенному выше способу, хотя даже для этих селсинов ошибка от наличия трения может несколько исказить результаты испытания.

Для контактных селсинов, обладающих значительным трением щеток, этот метод измерения реактивных моментов

непригоден. Необходим такой метод, при котором исключается момент трения щеток. Для этого в селсинах, имеющих обмотку возбуждения на роторе, возбуждение селсина должно осуществляться через контакты, практически не имеющие трения.

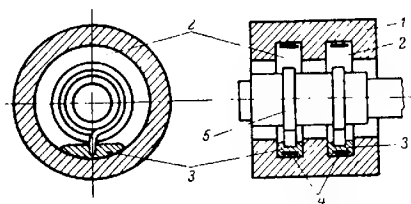


Рис. 189. Схема ртутных контактов.

Таким условиям, например, удовлетворяют ртутные контакты, схема которых изображена на рис. 189. Вокруг кон-

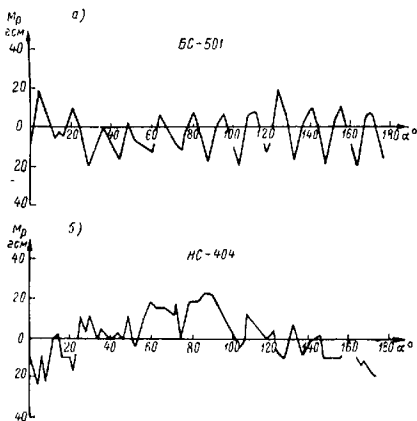


Рис. 190. Кривые реактивных моментов селсинов: а — для БС-501; б — для НС-404.

тактных колец, вместо щеточного устройства, крепится обойма 1, имеющая две кольцевые внутренние канавки 2, в каждой из которых помещается по одной капле ртути 3. По дну канавок 2 проложены круговые пластинки из латунной фольги 4,

на которые подается питание от сети переменного тока. К кольцам селсина крепятся вертикально два контакта 5; длина выступающих концов контактов выбирается такой, чтобы они касались капли ртути. Обойма 1 прикрепляется к крышке селсина и при повороте статора селсина поворачивается вместе с ним. Капли же ртути остаются все время в нижней части канавки 2, обеспечивая через контакты соединение обмотки возбуждения с сетью.

Полученные этим методом кривые реактивных моментов некоторых типов селсинов приведены на рис. 190 (см. также рис. 100, 101 и 102).

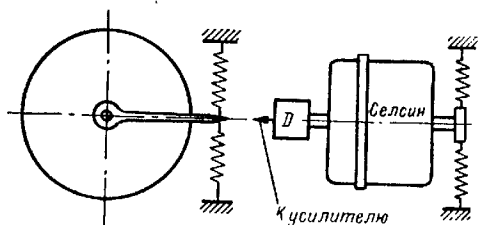


Рис. 191. Принципиальная схема макета для записи реактивных моментов.

С целью получения автоматической записи кривой реактивного момента как функции угла поворота был предложен ряд устройств, предусматривающих на роторе селсина указатели углового перемещения того или иного типа (емкостный, индукционный и др.). На рис. 191 приведена принципиальная схема такого макета. Упругие свойства пружины подбираются так, чтобы угловое перемещение селсина под действием реактивного момента не превышало $0,5 \div 1^\circ$. Сигнал, даваемый датчиком, усиливается усилителем и записывается на пленку с помощью осциллографа. Поскольку кривая реактивного момента селсина снимается только при специальных испытаниях, т. е. сравнительно редко, то эти устройства не получили распространения.

§ 46. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ ОШИБОК ИНДИКАТОРНЫХ СЕЛСИНОВ

Статические и динамические ошибки селсинов подробно рассмотрены в главе IV.

Ошибки селсинов, равно как и синхронизирующий момент, могут определяться: при работе одного приемника от датчика;

при параллельной работе нескольких приемников от датчика и в системах синхронной передачи с электрическим дифференциалом. Обычно определение статических ошибок производится при работе одного приемника от эталонного датчика, в качестве которого может быть взят селсин, однотипный с испытуемым, или другого типа, но обладающий небольшой электрической асимметрией (не более $10 \div 15'$).

При испытании селсин-приемник устанавливается в макет, снабженный шкалой, разделенной на 360° , с делениями через 1° . Диаметр шкалы для удобства отсчета берется равным $250 \div 300$ мм. На оси селсина устанавливается легкая сбалансированная стрелка с нониусом, дающая возможность производить отсчет по шкале с точностью $0,1^\circ$. Во избежание ввода погрешности в результаты испытания макет, на котором устанавливается селсин-приемник, должен обеспечивать точную центровку оси селсина относительно центра шкалы. Эталонный датчик устанавливается в макет с фиксатором и на оси ротора датчика устанавливается шкала, разделенная на 360° , имеющая на периферии через каждые 10° впадины для фиксирования положения. Погрешность в расположении фиксирующих впадин по окружности не должна превышать $2 \div 3$ угловых минут. После установки датчика и приемника в макеты, селсины включаются в сеть, шкала датчика и стрелка приемника устанавливаются на нуль. После этого медленно поворачивают ротор датчика по часовой стрелке на один оборот, фиксируя его положения через каждые 10° . Затем ротор датчика поворачивают против часовой стрелки на один оборот, также фиксируя его положения через каждые 10° . В каждом фиксированном положении датчика (36 положений при вращении по часовой стрелке и 36 положений при вращении против часовой стрелки) снимается отсчет по шкале приемника.

Разность в показаниях шкал датчика и приемника дает ошибку приемника со знаком плюс или минус. Полусумма абсолютных значений максимальных ошибок различных знаков для всех положений датчика дает максимальную ошибку, по которой устанавливается класс точности.

Следует указать, что снятие ошибок именно через 10° , через равные промежутки, не является обязательным. Более того, при такой проверке селсинов с зубцевым делением, кратным 10° (например, при $z = 12, 18$), ошибка от зубцевого реактивного момента может и не быть обнаружена.

Поэтому при проверке селсинов следует рекомендовать делать деления фиксирующих углублений шкалы, не кратные зубцевому делению селсина.

На рис. 96 и 97 были приведены кривые статических ошибок селсинов СС-404 и БС-404А.

Такой способ определения статических ошибок, хотя и простой по своему принципу, требует затраты значительного

количества времени и значительного напряжения зрения и внимания персонала, проводящего испытание. Поэтому предложены различного рода макеты для автоматической записи статических ошибок. Принципиальная схема одной из удачных конструкций макета приведена на рис. 192.

Статоры 1 испытуемого приемника и эталонного датчика 2 устанавливаются в общий стакан 3, поворачивающийся на шарикоподшипниках 4. Поворот стакана 3 осуществляется при помощи электродвигателя. Ротор эталонного датчика закрепляется неподвижно при помощи рычага 5, а ротор испытуемого приемника остается свободным и на его оси помещается

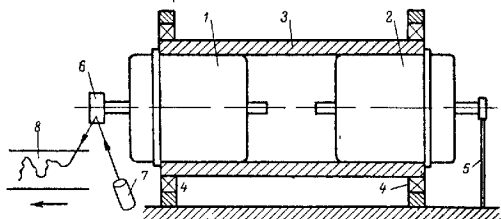


Рис. 192. Принципиальная схема макета для записи статических ошибок селсинов.

1, 2 — статоры приемника и датчика; 3 — стакан; 4 — шарикоподшипники; 5 — рычаг; 6 — зеркальце; 7 — источник света; 8 — фотоувствительная бумага.

маленькое зеркальце 6. Луч, выходящий из источника света 7, отражается от зеркальца 6 и попадает на фотоувствительную бумагу 8, перемещающуюся равномерно в направлении, указанном стрелкой.

Если бы испытуемый селсин не обладал ошибкой, то при повороте стакана 3 ротор его оставался бы неподвижным. При наличии ошибки у испытуемого селсина при повороте стакана 3 ротор селсина будет отклоняться от первоначального положения на величину ошибки. Пропорционально ошибке будет отклоняться также луч, отраженный от зеркальца, и на фотоувствительной бумаге автоматически будет зафиксирована статическая ошибка. Для определения кривой ошибки стакан 3 медленно (со скоростью 1 об/мин.) поворачивают на угол 360° сначала по часовой стрелке, а затем против часовой стрелки. Поворот, реверсирование и остановка стакана 3 производятся автоматически. Оператор устанавливает только селсин, фотобумагу и запускает установку.

Если интерес представляет только максимальное значение статической ошибки, то при вращении стакана фотобумагу можно не передвигать. Таким образом на небольшом отрезке

фотобумаги можно записать максимальные статические ошибки значительного числа селсинов-приемников (рис. 193). Половина получающейся на фотобумаге линии представляет в определенном масштабе максимальную статическую ошибку.

Экспериментальное определение динамических ошибок селсинов-приемников представляет значительные трудности. До сих пор отсутствует достаточно удобный и объективный метод такого определения.

В настоящее время применяются три метода определения:

а) синхронное фотографирование шкал датчика и приемника;

б) использование на роторе приемника указателя угла рассогласования специального типа (индукционного или емкостного);

в) использование оптического макета с призмой Дове.

При первом методе датчик и приемник устанавливаются в одинаковые макеты со шкалами; после возбуждения схемы стрелки датчика и приемников устанавливаются на нуль. Датчик приводится в принудительное вращение. Динамические ошибки определяются при равномерном вращении с той или иной скоростью и при вращении по синусному закону с определенными периодом и амплитудой вращения. Стрелки и шкалы датчика и приемника освещаются источником света и одновременно фотографируются. Динамические ошибки определяются путем считывания показаний датчика и приемника на фотопленке.

Недостатками данного метода следует считать его сложность, кроме того, не снимается кривая ошибок, а лишь фиксируются динамические ошибки отдельных точек. Поэтому с целью объективной оценки динамической ошибки селсина-приемника приходится снимать для каждого режима работы большое количество кадров (не менее 20—25). Обработка полученных кадров требует значительного времени.

При втором методе ротор селсина-приемника сочленяется с ротором какого-либо малогабаритного указателя угла рассогласования, например, индукционного, а статор указателя — с ротором селсина-датчика. В качестве указателя угла рассогласования может быть использован бесконтактный трансформаторный селсин-приемник малого габарита. Возникающий при рассогласовании селсинов электрический сигнал усиливается и записывается осциллографом. Основным недостатком этого метода является создание на оси приемника дополнительных инерционного момента и момента трения, что увеличивает действительные ошибки индикаторных синхронных передач.



Рис. 193. Лента с записью статических ошибок.

Третий метод основан на свойстве призмы Дове: если вращать призму Дове так, как указано на рис. 194, то видимые через призму предметы вращаются с двойной угловой скоростью. Принципиальная схема макета с призмой Дове изображена на рис. 195.

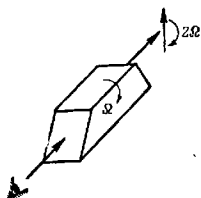


Рис. 194. Призма Дове.

Ось датчика с помощью муфты 8 соединяется с валом 6, на котором крепятся две шестерни 1 и 2. С шестерней 1 соединяется шестерня 3, на которой крепится шкала приемника 4. Передаточное число шестерен 1 и 3 равно единице. С шестерней 2 соединяется шестерня 5, внутри которой в специальной обойме 7 помещается призма Дове. На оси приемника крепится стрелка 9. При работе системы синхронной передачи шкала 4 и стрелка 9 вращаются в одну и ту же сторону с некоторой

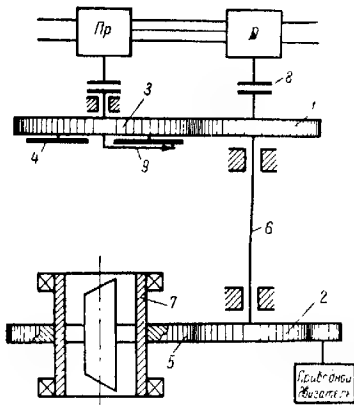


Рис. 195. Принципиальная схема макета с призмой Дове для визуального определения динамических ошибок селсина.

1, 2, 3, 5 — шестерни; 4 — шкала приемника; 6 — вал; 7 — обойма; 8 — муфта; 9 — стрелка.

угловой скоростью Ω , а призма Дове — в ту же сторону с угловой скоростью $\frac{\Omega}{2}$. В результате изображение стрелки

и шкалы, рассматриваемое через призму Дове, будет неподвижным. Если между датчиком и приемником появится ошибка, то она может быть прочитана по отклонению стрелки относительно шкалы.

Преимущество данного метода измерения динамических ошибок: непрерывный контроль ошибки и отсутствие дополнительных моментов на валу селсина-приемника; недостаток — невозможность объективной записи результатов измерений.

§ 47. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ СЕЛСИНОВ

Основные показатели, которыми характеризуются трансформаторные селсины-приемники, были рассмотрены в главе V. Такими показателями являются:

- а) электрическая асимметрия;
- б) крутизна управляющего напряжения и удельная мощность при оптимальной нагрузке;

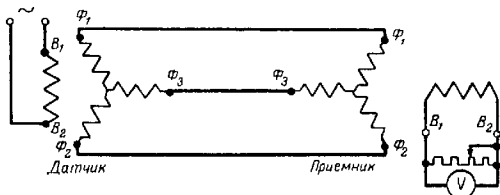


Рис. 196. Схема для определения крутизны управляющего напряжения и удельной мощности трансформаторного селсина.

- в) выходное сопротивление;
- г) статическая и скоростная ошибки.

Ниже приводятся экспериментальные методы определения перечисленных показателей.

Определение электрической асимметрии. Электрическая асимметрия трансформаторных селсинов-приемников определяется по методу 12 точек (см. § 42) при питании селсина со стороны трехфазной обмотки (рис. 177, а и б). Этот метод соответствует режиму работы селсина-приемника в трансформаторной синхронной передаче и поэтому определяемая этим методом величина электрической асимметрии характеризует статическую точность селсина-приемника.

Определение крутизны управляющего напряжения и удельной мощности. Для определения крутизны управляющего напряжения и удельной мощности собирается трансформаторная синхронная передача (рис. 196).

В качестве нагрузки на управляющую обмотку включается магазин сопротивлений. Напряжение на сопротивлении нагрузки измеряется вольтметром с высокоомным входом. Приемник устанавливается в макет, допускающий отсчет углов с точностью до $0,1^\circ$, и рассогласовывается относительно нулевого положения на угол $\beta = 5^\circ \div 10^\circ$. Изменяя сопротивление нагрузки R_n от 0 до ∞ , определяют управляющее напряжение U_y и мощность, выделяющуюся в сопротивлении нагрузки $P_n = \frac{U_y^2}{R_n}$, как функцию R_n (рис. 197).

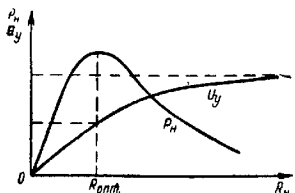


Рис. 197. Кривые зависимости управляющего напряжения и выходной мощности от сопротивления нагрузки.

При увеличении сопротивления нагрузки R_n напряжение увеличивается монотонно и имеет наибольшее значение при $R_n = \infty$; мощность сначала увеличивается, а затем уменьшается. Сопротивление, при котором мощность имеет максимальную величину, считается оптимальным.

По полученным данным вычисляют крутизну управляющего напряжения при оптимальной нагрузке $R_{\text{опт}}$ и при $R_n = \infty$ по формулам

$$u_{\text{опт}} = \frac{U_{y, \text{опт}}}{\beta^\circ}; \quad e_y = \frac{E_y}{\beta^\circ}.$$

Крутизну управляющего напряжения выражают в в/град .

Удельная мощность при оптимальной нагрузке, т. е. при таком значении сопротивления, когда P_n имеет максимальное значение, находится по формуле

$$P_0 = \frac{P_{n, \text{опт}}}{\beta^2}$$

и выражается в $\frac{\text{вт}}{\text{град}^2}$.

Отметим, что величина оптимальной нагрузки, крутизна напряжения и максимальная мощность зависят как от типа приемника, так и от типа датчика.

3. Определение выходного сопротивления трансформаторного селсина-приемника. Выходное сопротивление трансформаторной синхронной передачи определяется на основе теоремы взаимности для электрических цепей. Приемник рассогласовывается относительно датчика на угол $\beta = 5^\circ \div 10^\circ$, после чего измеряются: э. д. с. управляющей обмотки E_y и ток короткого замыкания I_k (при замы-

кании управляющей обмотки на амперметр). По полученным значениям э. д. с. и тока подсчитывается величина выходного сопротивления

$$z_{\text{вых}} = \frac{E_y}{I_k}.$$

Выходное сопротивление $z_{\text{вых}}$ зависит от угла рассогласования. В случае применения датчиков с электрическим демпферным контуром в поперечной оси эта зависимость оказывается незначительной, т. е. выходное сопротивление мало меняется от угла рассогласования.

Величина $z_{\text{вых}}$ может быть также определена при помощи моста переменного тока. Для этого предварительно собирается схема трансформаторной синхронной передачи и определяется нулевое положение приемника. Затем обмотка возбуждения датчика отключается от сети, ее зажимы закорачиваются, а зажимы сигнальной обмотки приемника включаются на входные зажимы моста переменного тока, после чего измеряется L и R на той частоте, на которой работают селсины. По замеренным величинам определяется выходное сопротивление

$$z_{\text{вых}} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}.$$

4. Определение статической и скоростной ошибок. Статические ошибки трансформаторного селсина-приемника определяются при его работе от эталонного датчика. Для этого собирается трансформаторная синхронная передача с использованием в качестве датчика эталонного датчика с электрической асимметрией, не более 3—5', а в качестве приемника — испытуемый селсин-приемник.

Датчик и приемник устанавливаются в макеты, допускающие отсчеты углов с точностью 2—3'. Такие макеты должны иметь шкалу с нониусом или оптический лимб. Управляющая обмотка селсина-приемника включается на ламповый вольтметр или электронный осциллограф. После согласования датчика и приемника (согласованное положение соответствует нулевому значению показания лампового вольтметра) ротор датчика поворачивается по всей окружности с фиксацией положений через каждые 5—10°. В каждом положении датчика поворотом ротора приемника добиваются минимального показания лампового вольтметра и в этом положении снимают отсчет по шкале макета, в котором установлен приемник. Разность углов поворота приемника и датчика представляет собой статическую ошибку.

На рис. 198 приведена типичная кривая статических ошибок трансформаторного бесконтактного селсина-приемника. Нетрудно заметить, что статическая ошибка в данном селсине обусловлена технологическими причинами, так как она имеет двукратную периодичность, в то время как ошибка, обуслов-

ленная несинусоидальностью распределения обмоток, имеет шестикратную периодичность, а ошибка зубчатого строения статора имеет периодичность, кратную числу пазов. Недостатком этого метода следует считать сложность макетов, необ-

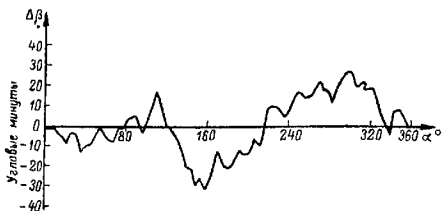


Рис. 198. Кривая статических ошибок трансформаторного бесконтактного селсина-приемника.

ходимых для проведения испытаний, а также значительную затрату времени.

С целью более быстрого снятия кривой ошибок были предложены макеты, в которых поворот приемника произ-

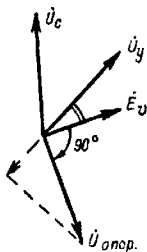


Рис. 199. Векторная диаграмма.

водится не вручную, а автоматически с помощью чувствительной усилительной схемы и управляемого двигателя переменного тока. По существу, в такого рода макетах выполнена следящая система, в которой угол рассогласования между задающей и исполнительной осями, измеряемый тем или иным устройством, представляет собой статическую ошибку трансформаторного селсина-приемника. Поскольку полная кривая статических ошибок снимается лишь при специальных исследованиях, подобного рода макеты широкого распространения не получили.

Скоростная ошибка трансформаторной синхронной передачи зависит от э. д. с. вращения, возникающей в управляющей обмотке селсина-приемника при его вращении с некоторой угловой скоростью ω . Поскольку э. д. с. вращения не совпадает по фазе с управляющей э. д. с., обусловленной рассогласованием селсинов (в селсинах на 50 гц она сдвинута по фазе на угол $30^\circ-40^\circ$), то имеется принципиальная возможность выбрать фазу опорного напряжения дискриминатора усилителя так, чтобы скоростная ошибка равнялась нулю. Для этого, очевидно, надо, чтобы опорное напряжение находилось в квадратуре с э. д. с. вращения (рис. 199). Следует иметь в виду,

что при этом значительно снижается эффективная крутизна управляющего напряжения (в $1,5 \div 2$ раза).

Следовательно, величина скоростной ошибки трансформаторного селсина-приемника зависит от выбора фазы опорного напряжения в усилителе. Поэтому в трансформаторном селсине-приемнике измеряется не скоростная ошибка, а величина и фаза э. д. с. вращения. По величине и фазе э. д. с. вращения и фазе опорного напряжения определяется скоростная ошибка.

Для определения э. д. с. вращения в управляющей обмотке собирается схема, приведенная на рис. 200. Датчик механи-

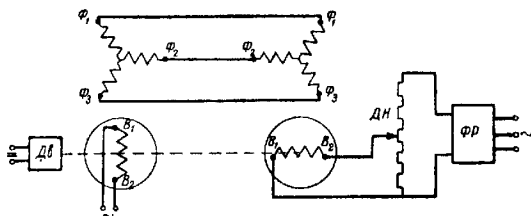


Рис. 200. Компенсационная схема для определения э. д. с. вращения трансформаторного селсина-приемника.

чески соединяется с приемником и приводится во вращение с постоянной скоростью от Двигателя постоянного тока. Скорость двигателя должна изменяться от 0 до 600 об/мин.

Управляющая обмотка селсина-приемника включена в компенсационную схему, с помощью которой находятся величина и фаза э. д. с. вращения.

Измерения производятся в следующей последовательности:

а) датчик и приемник путем разворота статора одного из них рассогласовываются на угол $5-10^\circ$ при неподвижных роторах. Трансформаторная э. д. с. компенсируется с помощью делителя напряжений и фазорегулятора. Полученное положение фазорегулятора принимается за нулевое;

б) датчик и приемник вновь согласовываются разворотом статоров и их роторы приводятся во вращение с некоторой угловой скоростью; э. д. с. вращения на управляющей обмотке компенсируется с помощью делителя напряжений и фазорегулятора. По полученным значениям величины и фазы э. д. с. вращения для нескольких скоростей вращения строятся графики зависимости этих величин от угловой скорости вращения селсинов.

ТАБЛИЦА АМПЕРВИТКОВ

(основная кривая намагничивания листовой электротехнической стали марки Э-42)

В гс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
0						0,43	0,49	0,53	0,56	0,59
1000	0,62	0,65	0,67	0,69	0,71	0,73	0,74	0,76	0,77	0,79
2000	0,80	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,91
3000	0,92	0,94	0,95	0,97	0,98	1,00	1,01	1,03	1,04	1,05
4000	1,06	1,08	1,10	1,12	1,14	1,16	1,18	1,20	1,22	1,24
5000	1,26	1,28	1,31	1,33	1,36	1,39	1,42	1,45	1,48	1,51
6000	1,54	1,57	1,60	1,63	1,66	1,70	1,73	1,77	1,81	1,85
7000	1,89	1,93	1,97	2,01	2,05	2,09	2,13	2,17	2,21	2,26
8000	2,31	2,37	2,43	2,49	2,55	2,61	2,67	2,73	2,79	2,85
9000	2,91	2,98	3,05	3,12	3,19	3,26	3,33	3,40	3,47	3,54
10000	3,62	3,70	3,79	3,88	3,98	4,08	4,18	4,28	4,38	4,49
11000	4,61	4,74	4,87	5,00	5,14	5,28	5,42	5,57	5,73	5,90
12000	6,08	6,25	6,44	6,63	6,83	7,03	7,24	7,46	7,68	7,90
13000	8,14	8,40	8,68	9,00	9,32	9,65	10,0	10,3	10,7	11,1
14000	11,5	11,9	12,3	12,7	13,2	13,7	14,3	15,0	15,7	16,5
15000	17,3	18,2	19,2	20,2	21,3	22,5	23,9	25,5	27,3	29,3
16000	31,5	33,7	36,0	38,5	41,2	44,0	46,9	50,0	53,3	56,7
17000	60,4	64,3	68,4	72,7	77,3	82,0	86,8	91,7	96,9	102
18000	108	114	120	126	132	136	144	151	158	165
19000	173	182	191	200	209	219	229	239	249	261
20000	273	286	301	317	335	355	380	410	445	485
21000	535	590	650	710	770	840	920	1000	1080	1160
22000	1240	1320	1400	1480	1560	1640	1720	1800	1880	1950
23000	2040	2120	2200	2280	2360	2440	2520	2600	2680	2760
24000	2840	2920	3000	3080	3160	3240	3320	3400	3480	3550
25000	3640	3720	3800	3880	3960	4040	4120	4200	4280	4360

ТАБЛИЦА ДЛЯ РАСЧЕТА АМПЕРВИТКОВ ЯРМА
(электротехническая сталь марки Э-42)

В зс	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900
						0,29	0,32	0,37	0,40	0,43
1000	0,46	0,48	0,50	0,51	0,53	0,55	0,56	0,57	0,58	0,60
2000	0,61	0,62	0,63	0,64	0,65	0,66	0,67	0,68	0,69	0,695
3000	0,7	0,705	0,71	0,72	0,73	0,74	0,75	0,755	0,76	0,77
4000	0,78	0,79	0,80	0,81	0,82	0,83	0,84	0,85	0,86	0,87
5000	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,97	0,99
6000	1,00	1,01	1,02	1,04	1,05	1,06	1,08	1,09	1,11	1,13
7000	1,15	1,17	1,19	1,21	1,22	1,24	1,26	1,28	1,30	1,33
8000	1,35	1,37	1,39	1,41	1,43	1,46	1,49	1,51	1,53	1,56
9000	1,59	1,61	1,64	1,67	1,70	1,73	1,76	1,79	1,88	1,85
10000	1,88	1,91	1,94	1,97	2,01	2,05	2,08	2,12	2,16	2,20
11000	2,24	2,28	2,32	2,37	2,42	2,47	2,52	2,58	2,64	2,70
12000	2,76	2,81	2,87	2,93	3,0	3,07	3,14	3,19	3,24	3,31
13000	3,38	3,46	3,54	3,62	3,7	3,78	3,87	3,97	4,07	4,17
14000	4,27	4,35	4,46	4,59	4,72	4,91	5,10	5,22	5,35	5,5
15000	5,67	5,89	6,13	6,33	6,55	6,83	7,10	7,45	7,8	8,2
16000	8,62	9,06	9,5	10,0	10,5	11,0	11,6	12,1	12,8	13,4
17000	14,1	14,9	15,7	16,5	17,4	18,3	19,1	20,0	21,0	22,0
18000	23,0	24,1	25,2	26,3	27,4	28,6	29,8	31,0	32,3	33,7
19000	35,1	36,8	38,5	40,1	41,7	43,5	45,4	47,2	49,0	51,2
20000	53,5	56,0	58,5	61,6	64,7	68,7	72,8	78,3	84,0	91,5
21000	99,5	109,5	120	130	141	164	167	181	195	208
22000	222	239	257	267	278	292	307	321	336	350
23000	365	374	384	403	423	437	452	467	482	498
24000	514	528	542	558	575	589	604	620	637	651
25000	666	683	700	716	732	741	760	778	797	817

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ДАННЫЕ
(новая)

Тип селсина	Режим работы	Номинальные				
		напряжение возбужде- ния, в	ток возбу- ждения не более, а	потребляе- мая мощ- ность не более, вт	вторичное напряже- ние, в	удельный момент, гс/град
БД-404А	Индикаторный	110	0,45	12,5	49	—
БС-404А	"	110	0,45	12,5	49	4,0
БД-501А	"	110	1,35	22,0	54	—
БС-501А	"	110	1,35	22,0	54	35
БС-500	"	127	0,45	18,0	55	9,0
Д БС-500	"	127	0,45	18,0	55	9,0
БД-500	"	127	0,45	18,0	55	—
БС-405	Трансформаторный	110	0,09	2,0	35	—
НД-404	Индикаторный	110	0,28	8,0	50	—
НС-404	"	110	0,28	8,0	50	10
НД-414	"	110	0,50	12,0	55	—
НД-501	"	110	0,70	13,0	57	—
НС-501	"	110	0,75	15,0	55	50
НД-511	"	110	1,0	15,0	57	—
НД-521	"	110	1,3	22,0	57	—
ДН-500	"	127	0,6	12,0	57	—
НД-511А	"	127	0,8	15,0	57	—
НЭД-101	"	50	—	—	50	6,0
НЭД-101А	Трансформаторный	49	—	—	49	—
НЭД-501	Индикаторный	57	—	—	57	40

Примечания: 1. Удельные моменты приведены для парной работы БС-501 от БД-501, БС-500 от БД-500, НЭД-101 от двух НД-404, НЭД-501 от двух НД-501.
2. Динамическая ошибка указана: в числителе — при равномерной заводке 720° и периодом $T = 6$ сек.

БЕСКОНТАКТНЫХ И КОНТАКТНЫХ СЕЛСИНОВ НА 50 гц
(серия)

данные								Габаритные размеры, мм			
удельная мощность, мвт/град ²	максималь- ная дина- мическая ошибка, град	момент инерции, гсм сек ²	время зату- хания, сек	момент трения		вес, кг		длина	посадочный диаметр	диаметр с буртиком	диаметр вала
				с возбу- ждением, гсм	без возбу- ждения, гсм						
6,2	—	0,135	—	10	7,5	1,2		119	62	67	4 с
6,2	5/7	0,348	2	10	7,5	1,25		119	62	67	4 с
43	—	1,45	—	50	15	3,75		150	100	110	5 с
43	5/7	3,94	2	35	15	4,0		150	100	110	5 с
11,5	5/7	0,9	3	16	12	2,4		85	100	110	4 с
11,5	5/7	0,9	3	16	12	4,5		160	100	110	4 с/8 с
11,5	—	0,9	—	16	12	2,3		85	100	110	4 с
—	—	0,135	—	20	7,5	1,2		119	62	67	4 с
17,7	—	0,13	3	25	20	0,8		119	62	67	4 д
17,7	4/6	0,13	—	14	11	0,8		119	62	67	4 д
28,7	—	0,23	—	30	25	1,18		149	62	67	4 д
70,5	—	1,55	—	70	50	2,8		150	100	110	5 д
60,0	4,6	1,68	3	30	30	2,77		150	100	110	5 д
126,5	—	2,13	—	80	55	3,7		167	100	110	5 д
281,0	—	3,14	—	90	60	5,0		197	100	110	5 д
83,6	—	1,54	—	90	70	3,0		150	100	110	5 с
126,5	—	2,13	—	90	70	3,7		167	100	110	5 с
—	4,6	0,22	4	10	10	0,8		119	62	67	4 д
—	—	0,22	—	10	10	0,8		119	62	67	4 д
—	4,6	1,95	4	30	30	2,5		150	100	110	5 д

от соответствующего по габаритам датчика; например: НС-404 от НД-404,
от двух НД-501, БС-404А от БД-404А, ДБС-500 от БД-500, НС-501 от НД-501.
со скоростью 60 об/мин., в знаменателе — при синусной заводке с амплитудой

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ДАННЫЕ КОНТАКТНЫХ СЕЛСИНОВ НА 50 гц
(старая серия) Приложение № 4

Тип селсина	Режим работы	Номинальные данные										Габаритные размеры, мм				
		напряжение возбуждения, в	ток возбужде- ния не более, а	потребляемая мощность не более, вт	вторичное напряжение, в	удельный момент, гсм/град	максимальная ошибка, град	момент инер- ции, гсмек	время затуха- ния, сек	с возбу- ждением, гсм	без возбу- ждения, гсм	вес, кг	длина	посадочный диаметр	диаметр с бугриком	диаметр вала
ДИ-404	Индикаторный	110	0,42	13,0	50	—	—	0,11	—	7,5	10,0	0,8	119	62	67	4 с
СС-404		110	0,42	13,0	50	4,0	5/7	0,11	3	7,5	9,0	0,8	119	62	67	4 с
СС-408		55	0,70	13,3	45	4,0	5/7	0,11	3	7,5	10,0	0,8	119	62	67	4 с
СС-410		55	0,75	13,0	50	4,5	5/7	0,11	3	7,5	9,0	0,8	119	62	67	4 с
ДИ-414		110	0,65	20,0	57	—	—	—	—	30	15	1,2	149	62	67	4 с
ДИ-425		55	1,0	18,0	55	—	—	0,17	—	30	15	1,2	149	62	67	4 с
СС-424		110	0,65	20,0	55	—	—	0,17	3	30	15	1,2	131,5	62	67	4 с
ДИ-500		110	1,0	17,0	55	—	—	2,0	—	50	50	3,4	150	100	110	5 с
СС-500		110	0,42	16,0	55	10,0	5/7	0,74	2	22	22	1,4	85	100	110	4 д
ДС-500		110	0,42	16,0	55	10,0	5/7	0,74	2	22	22	2,8	160	100	110	8 д
ДИ-501	Трансформаторный	110	0,70	15,0	55	—	—	1,3	—	50	50	3,4	150	100	110	5 с
СС-501		110	0,45	13,0	55	20,0	5/7	1,2	2	22	22	2,8	150	100	110	5 с
ДИ-511		110	1,0	18,0	57	—	—	2,2	—	50	50	3,8	167	100	110	5 с
ДИ-521		110	1,5	28,0	55	—	—	—	—	50	50	4,7	197	100	110	5 с
ЭД-101		50	—	—	—	2,0	5/7	0,11	4	22	9,0	0,8	119	62	67	4 д
ЭД-501		57	—	—	—	17,0	5/7	0,2	2	7,5	22	2,6	150	100	110	5 с
ДИД-505		57	—	—	—	—	—	1,2	—	50	50	2,65	150	100	110	5 с
СС-405		110	0,13	7,5	—	—	—	0,1	—	30	12	0,8	119	62	67	4 д

Примечание. См. примечание к приложению 3.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берендеев А. В., Синхронизация вращения на переменном и постоянном токах, Известия ЛЭТИ, вып. 20, 1937.
2. Буданцев Н. Н., Грузов Л. Н., Специальные электрические машины установок связи и радиолокации, ВКАС, 1948.
3. Васильев Д. В., Диаграммы токов индукционных систем синхронной связи, Труды ЛПИ, 3, 1947.
4. Васильев Д. В., Индукционные системы синхронной связи, Труды ЛПИ, 7, 1938.
5. Васильев Д. В., Индукционные системы синхронной связи, Госэнергоиздат, 1949.
6. Васильев Д. В., Расчет характеристик селсинов малой мощности. Доклад на 2-й научно-технической конференции ЛПИ, июль 1944 г.
7. Васильев Д. В., Система синхронной связи типа „селсин“, Труды ЛПИ, 1, 1946.
8. Васильев Д. В., Электрические машины в схемах синхронной связи, ОНТИ, 1935.
9. Васильев Д. В., Электрические машины в патентах (селсины). Экспертное бюро по изобрет., 1941.
10. Веребрюсов Н. А., Синхронные передачи и следящие системы, Судпромгиз, 1954.
11. Галтеев Ф. Ф., Исследование режимов работы трансформаторных селсинов применительно к их работе в следящих системах, Труды МЭИ им. В. М. Молотова, 15, 1955.
12. Городской Д. А., Теория селсинов, „Вестник электропромышленности“, 1—2, 1943.
13. Грузов Л. Н., Расчет характеристик схем синхронной связи с однофазными явнополюсными селсинами, Труды ВКАС, 21, 1949.
14. Иосифьян А. Г., Бесконтактный селсин как обобщенная синхронная машина, Бюллетень ВЭИ, 8, 1940.
15. Иосифьян А. Г., Теория трансформаторного режима селсинов в трансформаторных схемах силового синхронного управления, Бюллетень ВЭИ, 9, 1949.
16. Иосифьян А. Г., Каган Б. М., Основы следящего привода, Госэнергоиздат, 1954.
17. Иосифьян А. Г., Каган Б. М., Шереметьевский Н. Н., Теория амплитудно-селсинной синхронно-следящей системы, „Электричество“, 3, 1946.
18. Иосифьян А. Г., Каган Б. М., Теория синхронной селсинной передачи угла и вращения с датчиком и приемником, имеющими различные параметры, „Вестник электропромышленности“, 4, 1949.
19. Иосифьян А. Г. и Свечарник Д. В., Бесконтактные селсины, Бюллетень ВЭИ, 2, 1940.
20. Иосифьян А. Г., Свечарник Д. В., Селсины, Труды ВЭИ, вып. 57, Госэнергоиздат, 1941 г.

21. Каган Б. М., Исаев П. В., Авиационные селсины, „Электричество“, 10, 1945.
22. Костенко М. П., Электрические машины, специальная часть, Госэнергоиздат, 1949.
23. Крючков С. А., Синхронные приборы управления кораблем и электрические тахометры, Военмориздат, 1944.
24. Миллях А. Н., Основы теории трехмерных селсинов, Сборник трудов института электротехники Украинской Академии Наук, изд-во АН УССР, вып. 1, 1948 г.
25. Попков С. Л., Основы следящего электропривода, Оборонгиз, 1954.
26. Попов В. К., Искажения передачи селсинов в следящих системах, „Вестник электропромышленности“, 12, 1938.
27. Садовский И. М., Круговые диаграммы селсинной схемы, Труды ВЭИ, 4, 1941.
28. Свечарник Д. В., Расчет селсинов, Бюллетень ВЭИ, 8, 1940.
29. Свечарник Д. В., Методика расчета бесконтактных селсинов ВЭИ, „Вестник электропромышленности“, 1, 1941.
30. Спицин Д. В., Синхронная передача и следящий привод, ВИА, 1949.
31. Штурман Г. И., Индукционные машины в системе электрических валов (селсины), ГОНТИ, 1938.
32. Штурман Г. И., Селсины для дистанционной передачи поворота, „Вестник электропромышленности“, 7, 1938.
33. Чуприянов Е. В., Параллельная работа селсинов, Известия АИИ Казахской ССР, серия энергетическая, 6, № 131, 1954.
34. Хрущев В. В., Применение метода преобразования координат к теории систем синхронной связи на явнополюсных селсинах, диссертация, ЛПИ, 1950.
35. Эллер Э. И., Исследование самосинхронизирующейся синхронной передачи, ЛЭМИ, 1933.
36. Эллер Э. И., Синхронная передача переменного тока, Известия слаботочной промышленности, 1934.
37. van Allen R. L., Магнитный усилитель для синхронной передачи, Communication and Electronics, 10, 1954.
38. Corby R. A., Многообразие применения селсинов, Gen. El. Rew, 33, № 12, 1930.
39. Concordia, Kron G., Демпферные и синхронизирующие моменты силовых селсинов, Tr. AIEE, 64, 1945.
40. Chestnut H., Электрическая точность трансформаторной селсинной системы, Tr. AIEE, 65, 1946.
41. Elorcz L. D., Применение селсинов для контроля на расстоянии в нефтеперерабатывающей промышленности, Gen. El. Rew, 33, 1933.
42. Drake C. W., Синхронное механическое движение без механической связи, Maintenance, Eng., 60, 1932.
43. Kansen G., Система передачи угла с самосинхронизацией, Radio news, 35, № 2, 1946.
44. Holder L. F., Принципы работы селсинов, Gen. El. Rew, 33, № 9, 1933.
45. Johnson H., Устройство и применение селсинов Tr. AIEE 64, 1945.
46. Kronacker G., Статическая точность трансформаторной селсинной схемы, Tr. AIEE, 69, pt, 1950.
47. Linville T. M., Woodward J. S., Селсины в системах передачи угла Electrical Eng., 6, 1934.
48. Nowasky, Асинхронный двигатель, как селсин-приемник, Electrical Eng., 12, 1933.
49. Reding H. W., Синхронное движение без механической связи, El. Eng., 30, 1933.
50. Reichel W., Sylvander R., Применение селсинов для контроля на расстоянии в авиационных приборах, Joun. aeronaut. SC. 6, № 9, 1939.
51. Wayley L. W., Устройство и применение селсинов, Comlusion, 3, 1931.
52. Wright R. H., Применение селсинов для современных задач регулирования, Iron. and steel Eng., 10, 1933,

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Введение	
§ 1. Назначение синхронной передачи и ее основные показатели . . .	4
§ 2. Краткий исторический обзор развития систем синхронной связи . . .	15
Глава I	
Синхронные передачи на однофазном переменном токе	
§ 3. Устройство элементов синхронной передачи на однофазном переменном токе	30
§ 4. Принцип работы системы синхронной связи на однофазном переменном токе	33
§ 5. Упрощенная теория системы парной синхронной связи	35
§ 6. Демпфирование колебаний приемника в системах синхронной связи	43
Глава II	
Теория систем синхронной связи в установившемся режиме	
§ 7. Методы исследования систем синхронной связи на однофазном переменном токе	50
§ 8. Преобразование трехфазной синхронизирующей обмотки в эквивалентную ей двухфазную	51
§ 9. Уравнения э. д. с. и момента селсина	51
§ 10. Эквивалентные схемы селсина	61
§ 11. Уравнения э. д. с. и моментов селсина в осях d_1 и q_1 , повернутых на некоторый угол δ по отношению к осям d и q	71
§ 12. Система синхронной связи при малом угле рассогласования в режиме поворота ($v = 0$)	75
§ 13. Удельная мощность селсина в поперечной оси	81
§ 14. Парная работа селсинов при любых углах рассогласования	84

§ 15. Система парной синхронной связи при сдвиге фазы напряжений возбуждения датчика и приемника	100
§ 16. Система синхронной связи при наличии длинной линии	106
§ 17. Система парной синхронной связи при отсутствии напряжения на приемнике	113
§ 18. Работа селсина-приемника от мощного датчика	115
§ 19. Система синхронной связи с электрическим дифференциалом	117

Глава III

Теория электрического демпфирования колебаний селсина-приемника при согласовании

§ 20. Постановка задачи	124
§ 21. Уравнение э. д. с. и момента при малых колебаниях ротора селсина-приемника	127
§ 22. Правила замены оператора „р“ в уравнениях э. д. с. и при вычислении электромагнитного момента	129
§ 23. Расчет коэффициентов T_S и T_D синхронизирующего и демпферного моментов	130
§ 24. Время затухания селсина-приемника при согласовании	134

Глава IV

Ошибки индикаторной синхронной передачи

§ 25. Общие соображения	139
§ 26. Статические ошибки индикаторной синхронной передачи	140
§ 27. Динамические ошибки селсина-приемника	149
§ 28. Влияние изменений напряжения и частоты сети на ошибки селсинов	154

Глава V

Работа селсинов в трансформаторном режиме

§ 29. Назначение и принцип работы	156
§ 30. Теория трансформаторной синхронной передачи	161
§ 31. Ошибки трансформаторной синхронной передачи	167

Глава VI

Конструкция селсинов

§ 32. Сравнение конструктивных форм контактных селсинов	184
§ 33. Конструкция контактных селсинов	187
§ 34. Конструкция бесконтактных селсинов	215
§ 35. Сравнительная оценка контактных и бесконтактных селсинов	230

Глава VII

Расчет селсинов

§ 36. Выбор основных размеров, частоты и напряжения	233
§ 37. Расчет магнитной цепи контактных и бесконтактных селсинов	241